

KfK 4315  
Februar 1988

# **Stabilisierung der UF<sub>6</sub>-Verteilung und des Isotopengradienten einer Trenndüsenkaskade zur Urananreicherung**

P. Bley, J. S. Coelho, H. Hein, A. A. Souza  
Institut für Kernverfahrenstechnik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



Kernforschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Kernverfahrenstechnik

**KfK 4315**

**Stabilisierung der UF<sub>6</sub>-Verteilung und des Isotopengradienten  
einer Trenndüsenkaskade zur Urananreicherung**

P. Bley, J.S. Coelho, H. Hein\*), A.A. Souza

\*) von der Fakultät für Maschinenbau der Universität  
Karlsruhe (T.H.) genehmigte Dissertation

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## Stabilisierung der UF<sub>6</sub>-Verteilung und des Isotopengradienten einer Trenndüsenkaskade zur Urananreicherung

### Zusammenfassung

Bei dem im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten Trenndüsenverfahren zur Urananreicherung wird als Verfahrensgas ein Gemisch aus Uranhexafluorid (UF<sub>6</sub>) und einem leichten Zusatzgas (H<sub>2</sub> bzw. He) verwendet. Um in einer Trenndüsenkaskade den starken Transport des leichten Zusatzgases zum Kaskadenkopf zu kompensieren, wird der überwiegende Teil des Zusatzgasstromes am Kaskadenkopf über diskontinuierlich arbeitende Tieftemperaturabscheider entnommen und in den Kaskadenfuß zurückgeführt, während von dem abgeschiedenen UF<sub>6</sub> über Pufferbehälter ein UF<sub>6</sub>-Rückstrom kontinuierlich an den Kaskadenkopf zurückgespeist werden muß.

Bei den durch Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen festgelegten Betriebsbedingungen werden UF<sub>6</sub>-Fehlströme zum Kaskadenfuß transportiert, wo sie rasch abgebaut werden müssen. Am Kaskadenkopf entstehende UF<sub>6</sub>-Fehlströme durchlaufen die gesamte Kaskade und können daher zu einer erheblichen Verminderung der Trennleistung der Anlage führen.

An einer 10-stufigen Pilot-Anlage wurden die mit solchen UF<sub>6</sub>-Fehlströmen verbundenen Änderungen der UF<sub>6</sub>-Verteilung in der Kaskade und des <sup>235</sup>U-Isotopengradienten untersucht. Diese Pilot-Anlage wurde im Rahmen der deutsch-brasilianischen Zusammenarbeit auf dem Kernenergiegebiet von Karlsruhe in das Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) in Belo Horizonte transferiert und dort für den Betrieb mit Doppelumlenksystemen umgebaut.

Es wird zunächst gezeigt, daß selbst bei massiven UF<sub>6</sub>-Fehlströmen die notwendige stabile und gleichmäßige UF<sub>6</sub>-Verteilung in allen Stufen allein durch eine Regelung des UF<sub>6</sub>-Inventares der Fußstufe mit Hilfe des UF<sub>6</sub>-Abfallstromes am Kaskadenfuß (Tails-Strom) gewährleistet wird.

Der vom UF<sub>6</sub>-Transport abhängige <sup>235</sup>U-Isotopengradient muß zur Erzielung maximaler Trennleistung auf den vorgegebenen Wert gehalten werden. Hierzu wurde eine Regelung für den UF<sub>6</sub>-Transport entwickelt, wobei der Tails-Strom als Regelgröße und der UF<sub>6</sub>-Rückstrom aus dem Pufferbehälter am Kaskadenkopf als Stellgröße benutzt werden. Die durchgeführten Experimente belegen, daß durch die kombinierte Regelung des UF<sub>6</sub>-Inventares und des UF<sub>6</sub>-Transportes UF<sub>6</sub>-Fehlströme ausreichend schnell beseitigt werden, so daß nur vorübergehend geringfügige Abweichungen des <sup>235</sup>U-Isotopengradienten auftreten.

Die experimentell aufgenommenen Kennfelder des Doppelumlenksystems und die entwickelte Betriebsregelung wurden in die Rechenmodelle zur Simulation des Betriebsverhaltens der Pilot-Anlage eingeführt. Im Rahmen der Meßgenauigkeit besteht zwischen experimentell und rechnerisch ermitteltem Betriebsverhalten eine gute Übereinstimmung, die sowohl für die gasdynamischen Betriebsgrößen als auch für den <sup>235</sup>U-Isotopengradienten zutrifft.

## Stabilization of the UF<sub>6</sub>-Distribution and the Isotopic Gradient of a Separation Nozzle Cascade for Uranium Enrichment

### Abstract

The separation nozzle method of uranium enrichment developed at the Karlsruhe Nuclear Research Center uses as process gas a mixture of uranium hexafluoride (UF<sub>6</sub>) and a light auxiliary gas (H<sub>2</sub> and He, respectively). In order to compensate in a separation nozzle cascade for the pronounced transport of the light auxiliary gas to the top of the cascade, most of the auxiliary gas stream is extracted at the top of the cascade by means of cryo-separators operating in a cyclic mode and is recycled to the bottom of the cascade, while a UF<sub>6</sub> feedback of the UF<sub>6</sub> removed must be continuously returned to the top of the cascade through a buffer tank.

Under the operating conditions defined in the light of economic assessments, false flows of UF<sub>6</sub> are carried to the bottom of the cascade, where they must be dissipated quickly. False flows of UF<sub>6</sub> generated at the top of the cascade pass through the entire cascade and, consequently, can greatly reduce the separating power of the plant.

In a ten-stage pilot plant, the changes in UF<sub>6</sub> distribution in the cascade and in the <sup>235</sup>U isotopic gradient due to such false flows of UF<sub>6</sub> were studied. The pilot plant was transferred from Karlsruhe to the Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) at Belo Horizonte within the framework of German-Brazilian cooperation in the nuclear energy sector and converted there for operation with double deflection systems.

Initially, it is shown that even in the presence of massive false flows of UF<sub>6</sub> the required stable and uniform UF<sub>6</sub> distribution is ensured at all stages solely by controlling the UF<sub>6</sub> content in the bottom stage by means of the UF<sub>6</sub> tails flow at the bottom of the cascade.

The <sup>235</sup>U isotopic gradient, which is a function of UF<sub>6</sub> transport, must be kept at its preset level for maximum separation power. For this purpose, a control system for the transport of UF<sub>6</sub> has been developed in which the tails flow is used as a control variable and the UF<sub>6</sub> feedback flow from the buffer tank at the top of the cascade is used as a manipulated variable. The experiments performed document that the combined control of the UF<sub>6</sub> content and of the UF<sub>6</sub> transport allows false flows of UF<sub>6</sub> to be dissipated sufficiently quickly to that minor deviations in the <sup>235</sup>U isotopic gradient occur only temporarily.

The fields of characteristic curves of the double deflection system recorded experimentally, and the operation control developed, were entered into the computer models used to simulate the operating behavior of the pilot plant. Within the limit of measuring accuracy, there is good agreement between the operating characteristics determined experimentally and by means of computation, both with respect to the gas dynamics operating parameters and the <sup>235</sup>U isotopic gradient.

## INHALTSVERZEICHNIS

Seite

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Einleitung und Überblick  | 1  |
| 2.  | Beschreibung der Pilot-Anlage und der Rechenmodelle   | 6  |
| 2.1 | Aufbau der Pilot-Anlage   | 6  |
| 2.2 | Kenngößen der verwendeten Trennelemente   | 10 |
| 2.3 | Die Stufenkennlinie   | 12 |
| 2.4 | Rechenmodelle   | 15 |
| 3.  | Einregelung in den Sollarbeitspunkt und Störungsanalyse<br>im Kreislauf   | 15 |
| 3.1 | Einregelung der Trenndüsenstufen in den Sollarbeitspunkt  | 15 |
| 3.2 | Störungsanalyse bei lokalen Störungen   | 18 |
| 4.  | Begründung und Realisierung der Betriebsregelung  | 22 |
| 4.1 | Begründung der Betriebsregelung   | 22 |
| 4.2 | Realisierung der UF <sub>6</sub> -Inventarregelung  | 23 |
| 4.3 | Realisierung der UF <sub>6</sub> -Transportregelung   | 28 |
| 4.4 | Gasdynamische Erprobung der Betriebsregelung  | 31 |
| 5.  | Einhaltung des <sup>235</sup> U-Isotopengradienten durch die<br>UF <sub>6</sub> -Transportregelung                  | 33 |
| 5.1 | Experimentelle Bestimmung des <sup>235</sup> U-Isotopengradienten<br>in Abhängigkeit vom UF <sub>6</sub> -Transport | 33 |
| 5.2 | Berechnung des instationären Verlaufes des<br><sup>235</sup> U-Isotopengradienten                                   | 35 |
| 6.  | Diskussion  | 39 |
| 7.  | Literaturverzeichnis  | 42 |
| 8.  | Nomenklatur   | 44 |

## 1. Einleitung und Überblick

Zur Anreicherung des leichten Uranisotopes  $^{235}\text{U}$  wird im Kernforschungszentrum Karlsruhe das Trenndüsenverfahren entwickelt, das die Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen gekrümmten Gasströmung ausnutzt [1]. Als Verfahrensgas dient  $\text{UF}_6$ , dem ein leichtes Zusatzgas  $\text{H}_2$  oder  $\text{He}$  im hohen molaren Überschuß zugegeben wird. Die positive Wirkung des Zusatzgases beruht vor allem auf der mit der Verminderung des mittleren Molekulargewichts verbundenen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit des Gases.

Bei dem in Abb. 1 dargestellten "Einzelumlenksystem" expandiert das Verfahrensgas entlang einer gekrümmten Umlenk wand, an deren Ende ein Abschäler den Gasstrom in eine mit  $^{235}\text{UF}_6$  und Zusatzgas angereicherte leichte Fraktion und eine an  $^{235}\text{UF}_6$  und Zusatzgas verarmte schwere Fraktion aufteilt. Da der optimale Gasdruck umgekehrt proportional zu den charakteristischen Abmessungen des Trennsystems ist und ein möglichst hoher Gasdruck aus wirtschaftlichen Gründen anzustreben ist, werden die charakteristischen Abmessungen so klein wie möglich gewählt. Da die relative  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverschiebung zwischen den beiden Fraktionen nur etwa 2 % beträgt, muß für die Anhebung der Isotopenkonzentration von 0,711 Gew.-%  $^{235}\text{U}$  des Natururans auf die für Leichtwasserreaktoren erforderliche Konzentration von ca. 3 Gew.-%  $^{235}\text{U}$  der Trennvorgang in einer Trenndüsenkaskade einige hundert mal wiederholt werden.

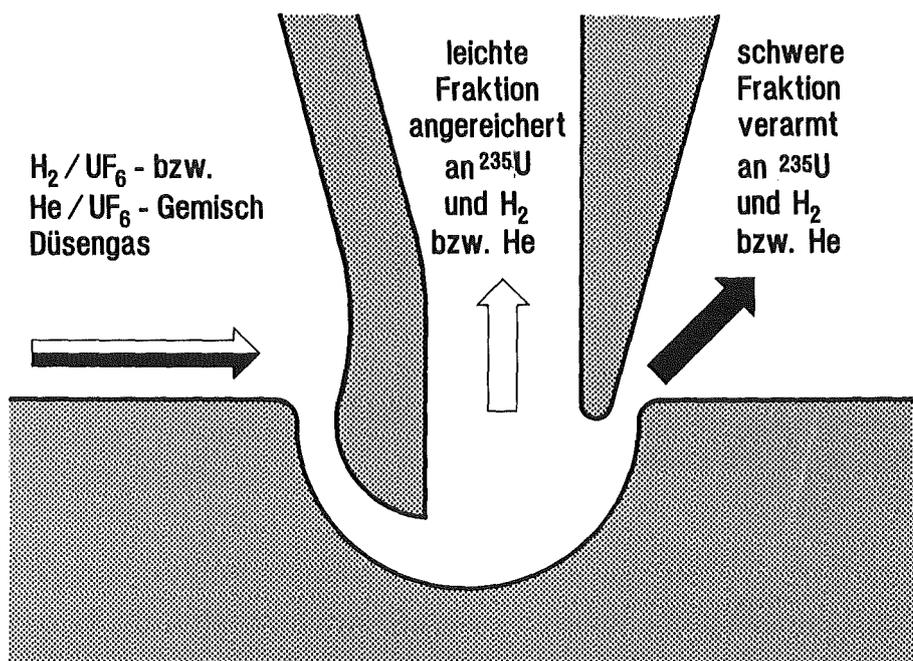
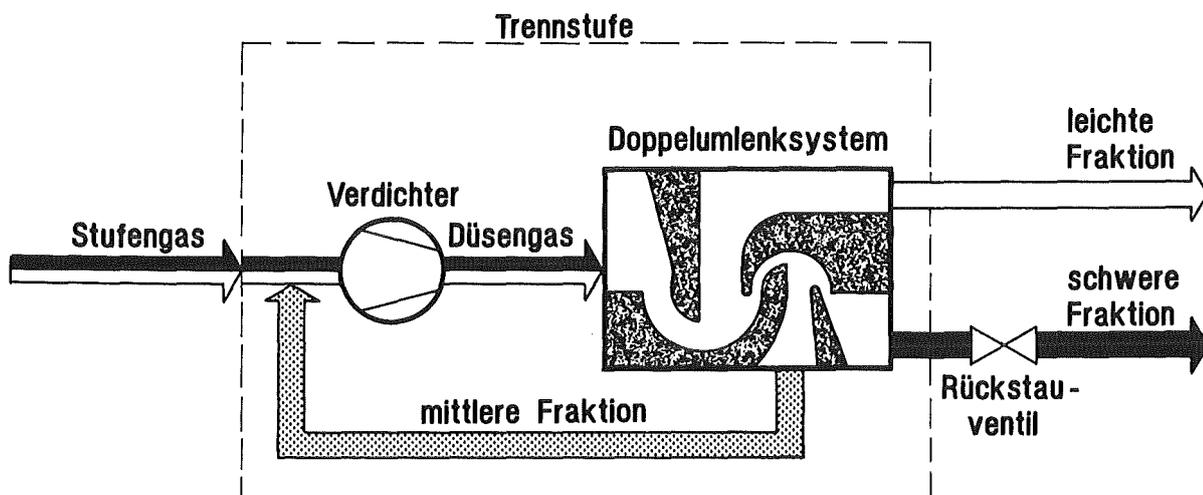


Abb. 1: Prinzip des Trenndüsenverfahrens mit Einzelumlenksystem.

Die erforderliche Stufenzahl einer Trenndüsenkaskade läßt sich um 30 - 40 % vermindern, wenn anstelle des in Abb. 1 gezeigten Einzelumlenksystems das in Abb. 2 dargestellte "Doppelumlenksystem" verwendet wird [2]. Wie aus der Abbildung hervorgeht, wird bei diesem System 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 Isotopenmischungsverhältnis etwa dem des in der ersten Düse eingespeisten Gases entspricht, wird innerhalb der Trennstufe auf die Ansaugseite des Verdichters zurückgeführt. Trotz der mit der Rückführung der mittleren Fraktion verbundenen Verminderung des effektiven Gasdurchsatzes der Stufe wird die Trennarbeitsleistung um etwa 10 % erhöht, was zu einer entsprechenden Verminderung des spezifischen Energieverbrauchs des Verfahrens führt. Ein Nachteil des Doppelumlenksystems ist sein größerer Herstellungsaufwand.



**Abb. 2:** Prinzip des Trenndüsenverfahrens mit Doppelumlenksystem und Verschaltung zu einer Trenndüsenstufe.

Aufgrund der starken Trennung zwischen  $UF_6$  und leichtem Zusatzgas entsteht in einer Trenndüsenkaskade bei beiden Trenndüsenystemen ein großes Nettostrom des leichten Zusatzgases in Richtung Kaskadenkopf. Um dort eine Anreicherung des leichten Zusatzgases zu verhindern, muß es möglichst  $UF_6$ -frei zum Kaskadenfuß zurückgeführt werden.

Eine erste technische Anwendung des Trenndüsenverfahrens ist in Brasilien im Rahmen der deutsch-brasilianischen Kernenergievereinbarungen vorgesehen: In Resende bei Rio de Janeiro wird z.Z. die Inbetriebnahme einer aus 24 technischen Trenndüsenstufen bestehenden Vorlaufkaskade vorbereitet, die mit dem in Abb. 1 gezeigten "Einzelumlenksystem" ausgerüstet ist [3]. Für die Feintrennung von  $UF_6$  und Zusatzgas sind zyklisch arbeitende Tieftemperaturabscheider vorgesehen, die naturgemäß diskontinuierlich arbeiten. Das am Kaskadenkopf abgeschiedene  $UF_6$  muß daher in einem Pufferbehälter gesammelt und von dort mit der richtigen Stromstärke in den Kaskadenkopf zurückgespeist werden. Die Anlage arbeitet also nach dem in Abb. 3 dargestellten Schema.

Bei den nach ökonomischen Gesichtspunkten festgelegten Betriebsbedingungen wird ein am Kopf der Anlage zeitweilig eingespeicherter  $UF_6$ -Überschuß relativ schnell zum Kaskadenfuß transportiert und dort mit dem Tails-Strom (Abfallstrom) ausgetragen. Dabei können schon kleine Fehlströme zu einer erheblichen Verminderung der Trennarbeitsleistung der Anlage führen [4]. In der vorliegenden Arbeit sollten die mit solchen Fehlströmen verbundenen Änderungen der  $UF_6$ -Verteilung und des  $^{235}U$ -Isotopengradienten an einer von Karlsruhe in das Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) in Belo Horizonte (Brasilien) transferierten 10-stufigen Pilot-Anlage experimentell untersucht und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung aufgezeigt werden. Die früher mit Einzelumlenksystemen ausgerüstete Pilot-Anlage [5] wurde für den Betrieb mit Doppelumlenksystemen umgebaut. Der Betriebspunkt wurde dabei so gewählt, daß ein  $UF_6$ -Überschuß, wie in der Vorlaufkaskade in Resende, zum Kaskadenfuß transportiert wird.

Wie aufgrund vorheriger Simulationsrechnungen erwartet wurde, wirken sich beim Doppelumlenksystem, im Gegensatz zum Einzelumlenksystem, Eingriffe über das Rückstauventil hauptsächlich auf den Betriebszustand der betreffenden Stufe aus. Unter Ausnutzung dieses Verhaltens wurden die jeweils auftretenden maximalen Abweichungen an den betreffenden Stufen mit Hilfe der Rückstauventile halbiert und so eine schnelle Einregelung aller Stufen erreicht.

Bei den weiteren experimentellen Untersuchungen wurde für die Pilot-Anlage die in der Abb. 4 dargestellte Betriebsart gewählt, welche dem Abstreifteil einer Kaskade entspricht. Aus der schweren Fraktion der Fußstufe wird der erforderliche Tails-Strom entnommen und vollständig in einem kleinen Tieftemperaturabscheider ausgefroren. Für die Trennung des leichten Zusatzgases vom  $UF_6$  werden am Kaskadenkopf zyklisch arbeitende Tieftemperaturabscheider einge-

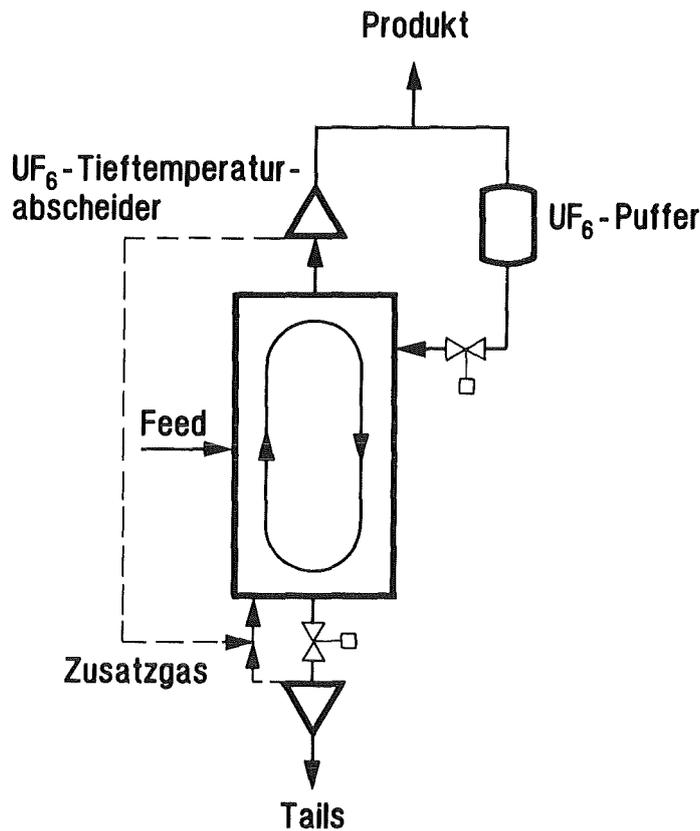


Abb. 3: Vereinfachtes Schema der 24-stufigen Vorlaufkaskade\* in Resende (Brasilien).

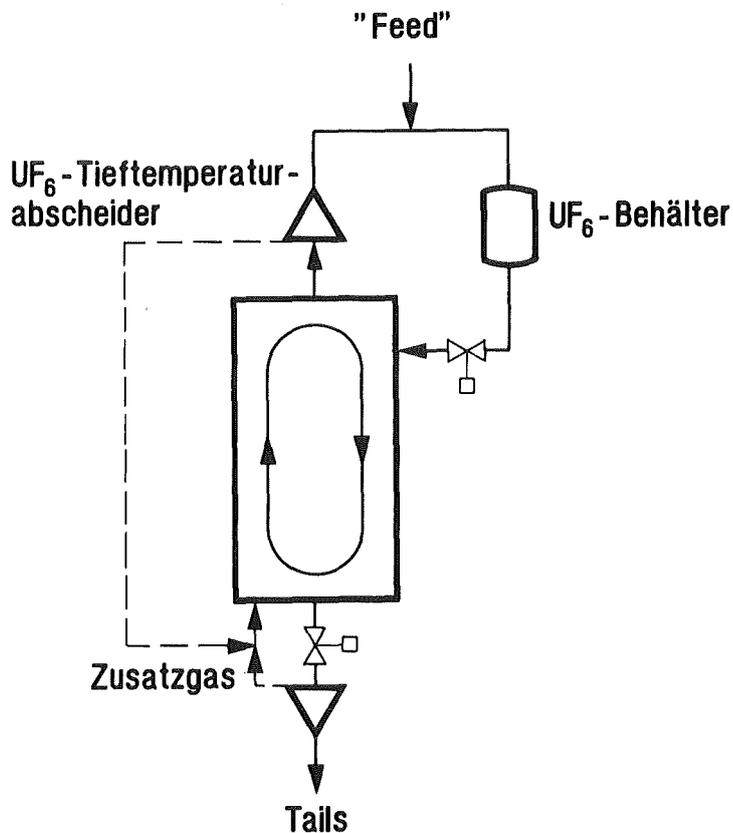


Abb. 4: Schema der in der vorliegenden Arbeit benutzten 10-stufigen Trenndüsen-Pilot-Anlage\* in Belo Horizonte (Brasilien).

\*Die eingetragenen Kaskadenumlaufströme kennzeichnen die  $UF_6$ -Ströme in den kaskadenaufwärts führenden leichten Fraktionen und in der kaskadenabwärts führenden schweren Fraktion. Hieraus resultiert ein zum Kaskadenkopf bzw. ein zum Kaskadenfuß gerichteter  $UF_6$ -Strom, der im stationären Betriebszustand dem zu entnehmenden Produkt- bzw. Tails-Strom entspricht.

setzt. Zur Aufrechterhaltung der Materialbilanz wird das in den beiden Tieftemperaturabscheidern abgeschiedene  $\text{UF}_6$  aus einem Vorratsbehälter als  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom vor die Kopfstufe zurückgespeist. Da der  $\text{UF}_6$ -Inhalt des Vorratsbehälters groß gegenüber den während der einzelnen Versuche mit dem Tails-Strom entnommenen und an  $^{235}\text{U}$  verarmten  $\text{UF}_6$ -Mengen ist, bleibt der  $^{235}\text{U}$ -Gehalt des  $\text{UF}_6$  im Vorratsbehälter praktisch konstant.

Die Auslegung der Tails-Entnahme wurde so gewählt, daß der Tails-Strom über ein Regelventil in einem großen Bereich variiert werden kann. Mit dem Tails-Strom als Stellgröße wurde für das  $\text{UF}_6$ -Inventar der Fußstufe eine Regelung realisiert, welche am Ort der größten Störauswirkung direkt und mit geringer Verzögerung eingreift und so der Akkumulierung von  $\text{UF}_6$ -Störinventar schnell entgegenwirkt. Eine  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung der Fußstufe, bei welcher der  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom als Stellgröße dient, wäre zwar bei kleiner Stufenzahl noch realisierbar, scheidet jedoch aufgrund der mit der Stufenzahl wachsenden Verzögerung bei größeren Kaskaden aus.

Die experimentellen Ergebnisse mit dieser  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung zeigen, daß sowohl bei massiven permanenten Störungen der externen  $\text{UF}_6$ -Ströme am Kaskadenkopf als auch bei lokalen Störungen einzelner Stufen nur geringfügige Abweichungen der  $\text{UF}_6$ -Inventarverteilung innerhalb der Kaskade auftreten. Die zur Aufrechterhaltung des Kaskadenbetriebes notwendige Stabilisierung der  $\text{UF}_6$ -Verteilung kann somit nur durch die Regelung des  $\text{UF}_6$ -Inventares der Fußstufe gewährleistet werden, da sie ein Überschreiten der zulässigen Betriebsgrenzen der Verdichter und die damit verbundene Abschaltung durch den installierten Komponentenschutz verhindert.

Mit dieser  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung allein ist es jedoch nicht möglich, Abweichungen des  $\text{UF}_6$ -Transportes vom Sollwert und die hierdurch verursachten Änderungen des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten zu beseitigen. Die zur Erzielung einer maximalen Trennleistung notwendige Einhaltung des vorgegebenen  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten wird durch die Regelung des  $\text{UF}_6$ -Transportes erreicht, bei welcher der  $\text{UF}_6$ -Tails-Strom als Regelgröße und der  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom als Stellgröße benutzt werden. Auf diese Weise werden durch Fehleinstellungen von Stufen in der Nähe des Kaskadenkopfes verursachten Abweichungen des  $\text{UF}_6$ -Transportes vom Sollwert durch entsprechende Änderungen des  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstromes beseitigt. Da die Einstellzeit des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten etwa eine Größenordnung länger als die des  $\text{UF}_6$ -Transportes ist, können  $\text{UF}_6$ -Transportstörungen ausgeglichen werden bevor der  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradient eine deutliche Änderung erfährt.

Da die Pilot-Anlage wie der Abstreifeteil einer Kaskade arbeitet, wird der  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradient wesentlich durch die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration des Tails-Stromes festgelegt, mit dessen Zunahme der  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradient abnimmt. Diese Abhängigkeit wurde erstmals für verschiedene stationäre Betriebszustände massenspektrometrisch gemessen, wobei der  $\text{UF}_6$ -Transport in einem großen Bereich variiert wurde. Durch lokale Störungen an einzelnen Stufen in der Nähe des Kaskadenkopfes wurden bei ausgeschalteter  $\text{UF}_6$ -Transportregelung permanente Zunahmen des  $\text{UF}_6$ -Transportes von etwa 50 % bis 70 % induziert, die zu relativen Abnahmen des stationär gemessenen  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten von bis zu 15 % führten. Bei eingeschalteter  $\text{UF}_6$ -Transportregelung lag die Abnahme des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten bei diesen Störungen unterhalb der Nachweisgrenze.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in die bestehenden Rechenmodelle zur Simulation des instationären Betriebsverhaltens die Kennfelder des Doppelumlenksystems und die Betriebsregelung der Pilot-Anlage eingeführt. Die mit den angepaßten Simulationsprogrammen gewonnenen Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Dies trifft sowohl für das stationäre und instationäre gasdynamische Betriebsverhalten der Kaskade als auch für den  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten und seine Abhängigkeit vom  $\text{UF}_6$ -Transport zu. Damit steht ein von der Pilot-Anlage unabhängiges Instrumentarium für die Planung und Überwachung von Trenndüsenanlagen zur Verfügung.

## 2. Beschreibung der Pilot-Anlage und der Rechenmodelle

### 2.1 Aufbau der Pilot-Anlage

Eine Gesamtansicht der Pilot-Anlage ist in der Abb. 5 gegeben. Sie besteht aus 10 Trennstufen, deren  $\text{UF}_6$ -Durchsatz um ca. 4 Größenordnungen kleiner als der technischer Trennstufen ist. Das aus  $\text{UF}_6$  und dem leichten Zusatzgas Helium bestehende Verfahrensgas wird von Roots-Verdichtern komprimiert. Als Trennelemente wurden Doppelumlenksysteme (s. Abb. 2) eingesetzt, welche nach dem Formätzverfahren hergestellt wurden [6]. Bei der vorliegenden Verschaltung (Abb. 6) mit dem nominellen  $\text{UF}_6$ -Stufenabschälverhältnis  $\theta_U^n = 1/2$  wird die leichte Fraktion zur nächsten kaskadenaufwärts gelegenen und die schwere Fraktion zur vorherigen kaskadenabwärts gelegenen Stufe geführt. Um den konstruktiven Aufwand des Umbaus der Pilot-Anlage [7] für den Betrieb mit Doppelumlenksystem gering zu halten, erfolgt an den Trennstufen Nr. 2 bis Nr. 9 die interne Rückführung der mittleren Fraktion nicht unmittelbar auf die Saug-

seite des Roots-Verdichters derselben Stufe, sondern über die Trennelementkammer der vorherigen Stufe. Die hier entstehende Vermischungsfraction wird dann mit der schweren Fraction der kaskadenaufwärts gelegenen Stufe direkt vor der Saugseite des Roots-Verdichters zusammengeführt. Nur an der Stufe Nr. 10 wurde die Leitungsführung so gewählt, daß die in der Abb. 7 gezeigte Reihenfolge der Vermischung entsteht und so sämtliche partielle Abschälverhältnisse  $\theta_i^k(10)$  gemessen werden können.

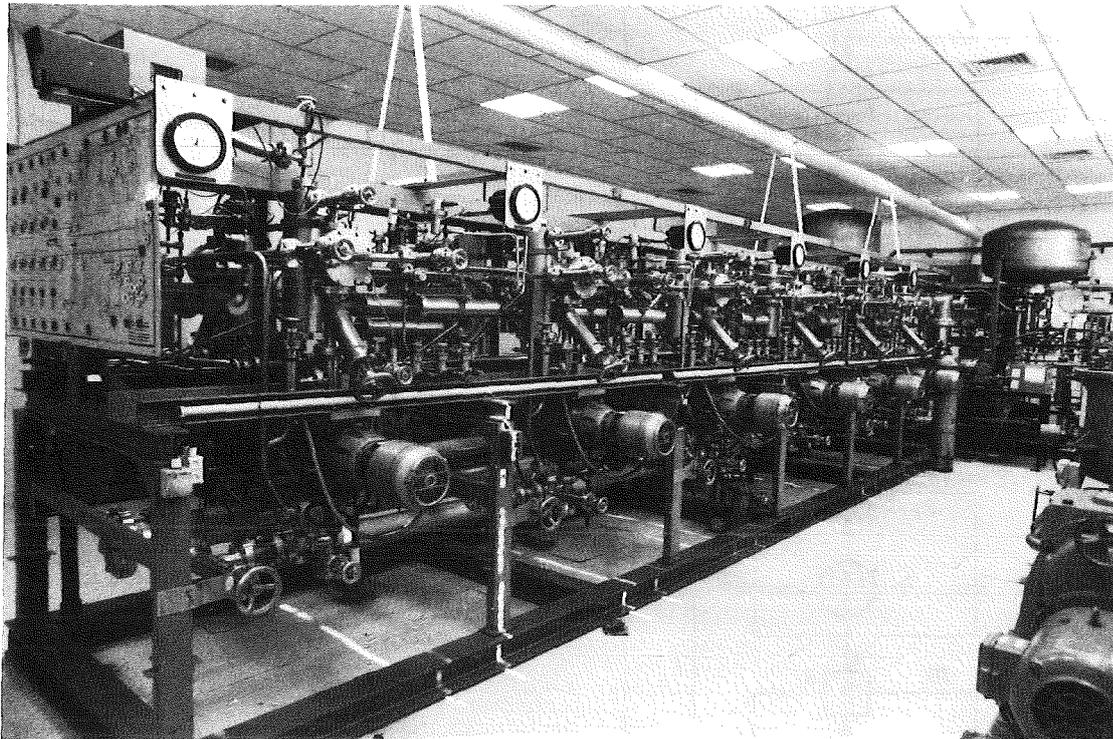


Abb. 5: Gesamtansicht der 10-stufigen Pilot-Anlage im CDTN in Belo Horizonte.

Bei der Pilot-Anlage besteht die Gemischtrennanlage am Kaskadenkopf aus zwei zyklisch arbeitenden Tieftemperaturabscheidern, in welchen der in der leichten Fraktion der Kopfstufe (Stufe 10) enthaltene  $UF_6$ -Strom UTTA abgeschieden wird.

$$UTTA = L_u^{St}(10) \cdot \theta_u^{St}(10) \quad (1)$$

Der  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom URP mit der natürlichen Isotopenzusammensetzung wird aus  $UF_6$ -Vorratsbehältern gespeist, in welche das abgeschiedene  $UF_6$  aus den Tieftemperaturabscheidern am Ende eines jeden Abscheidezyklus transferiert wird. Mit einer überkritischen Meßblende wird der  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom gemessen, wobei der  $UF_6$ -Einspeisedruck  $P_{RP}$  über ein  $UF_6$ -Einspeiseventil in einem ausreichend großen Bereich verändert werden kann.

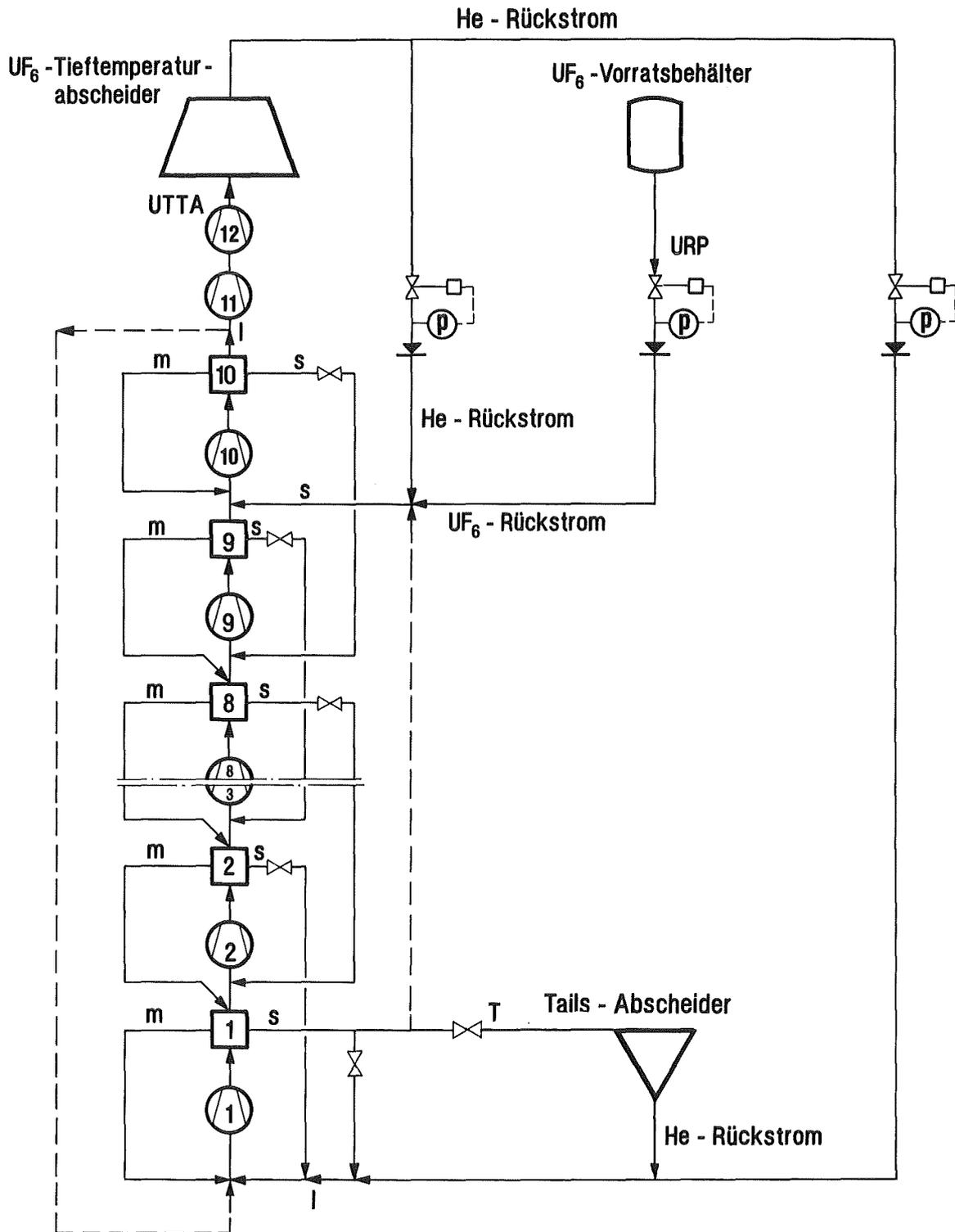


Abb. 6: Vereinfachtes Fließschema der Pilot-Anlage, welche als Abstreifteil einer Kaskade geschaltet ist. Die Überbrückungsleitungen für den Kreislaufbetrieb sind gestrichelt eingezeichnet.

Zur Vereinfachung der versuchstechnischen Durchführung wurde für die Pilot-Anlage eine Betriebsart gewählt, welche dem Abstreifteil einer Kaskade entspricht. Da im Abstreifteil ein zum Kaskadenfuß gerichteter  $UF_6$ -Transport  $\tau_u$  besteht, gilt bei dieser speziellen Betriebsart folgende Bilanz für die externen  $UF_6$ -Ströme der Kaskade:

$$URP = UTTA + T \quad (2)$$

Von dem in die Tieftemperaturabscheider eintretenden Zusatzgas wird am Ausgang der Molstrom des Zusatzgases einer schweren Fraktion über ein Regelventil mit Meßblende vor die Kopfstufe geführt, während der zum Kaskadenkopf gerichtete Zusatzgastransport  $\tau_z$  mit der Stromstärke

$$\tau_z = L_z^{St} \cdot (2 \cdot \theta_z^{St} - 1) \quad (3)$$

über ein Regelventil mit Meßblende auf konstanten Wert geregelt und direkt vor die Fußstufe (Stufe 1) zurückgeleitet wird.

Am Kaskadenfuß wird die schwere Fraktion abzüglich eines kleinen Teilstromes vor dieselbe Stufe geleitet und bildet mit dem insgesamt rückgeführten Zusatzgasstrom die Stromstärke einer leichten Fraktion. Der aus der schweren Fraktion der Fußstufe entnommene Teilstrom wird über ein Regelventil einem Tieftemperaturabscheider zugeführt, in welchem das in diesem Teilstrom enthaltene  $UF_6$  als Tails T ausgefroren wird.

Zur Erfassung des Betriebszustandes der Pilot-Anlage ist jede Stufe mit einem Druckaufnehmer auf der Druckseite des Roots-Verdichters sowie in der Leitung der leichten und der schweren Fraktion ausgerüstet. Die Stufen eins bis zehn sind mit je einem  $\alpha$ -Ionisationsdetektor [8] zur Bestimmung der Düsengaskonzentration bestückt. Die Kopfstufe ist zusätzlich mit vier weiteren  $\alpha$ -Ionisationsdetektoren ausgerüstet, so daß hier aus den gemessenen  $UF_6$ -Konzentrationen alle partiellen Abschälverhältnisse bestimmt werden können. Über ein rechnergesteuertes Datenerfassungssystem werden 70 Meßstellen abgefragt und in einem Kaskadenüberwachungsprogramm aufbereitet. In Abständen von fünf bis zehn Sekunden erfolgt eine vollständige Überwachung und Dokumentation des Betriebszustands der Pilot-Anlage.

## 2.2 Kenngrößen der verwendeten Trennelemente

In Abb. 7 ist das Ersatzschaltbild der in der Pilot-Anlage verwendeten Doppelumlenksysteme zusammen mit den wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Betriebszustandes dargestellt. Der Molstrom  $L_i^1$  mit der molaren  $UF_6$ -Konzentration  $N_o$  wird vom Verdichter auf den Einlaßdruck  $P_o$  komprimiert und dem ersten Trennsystem zugeführt. In diesem ersten Trennsystem wird das Verfahrensgas unter Expansion auf den Druck  $P_l$  in eine leichte Fraktion mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_l$  und eine schwere Fraktion des ersten Trennsystems mit dem Molstrom  $L_i^2$  getrennt, welche direkt dem zweiten Trennsystem zugeführt wird. Die im zweiten Trennsystem entstehende mittlere Fraktion mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_m$  expandiert auf den Druck  $P_m$  und wird innerhalb der Stufe auf die Saugseite des Verdichters zurückgeführt, während der zweite Teilstrom als schwere Fraktion mit der  $UF_6$ -Konzentration  $N_s$  bei einem Druck  $P_s$  die Trennstufe verläßt. Da die mittlere Fraktion innerhalb der Stufe zirkuliert, ist der Stufendurchsatz  $L_i^{St}$  um den Molstrom der mittleren Fraktion kleiner als der Verdichterdurchsatz  $L_i^1$ .

Das partielle Abschälverhältnis  $\theta_i^k$  für die Komponente  $i$  des Verfahrensgases im Trennsystem  $k$  ist definiert als Verhältnis des Molstromes der Komponente  $i$  in der leichten Fraktion zu dem in das Trennsystem  $k$  eintretenden Gesamtstrom der Komponente  $i$ :

$$\theta_i^k = \frac{\text{Molstrom der Komponente } i \text{ in der leichten Fraktion des Trennsystems } k}{\text{Gesamtstrom der Komponente } i \text{ durch das Trennsystem } k} \quad (4)$$

Die Entmischung zwischen dem leichten Uranisotop  $^{235}U$  und dem schweren Uranisotop  $^{238}U$  in der Trennstufe wird durch den elementaren Trenneffekt  $\epsilon_A^{St}$  angegeben:

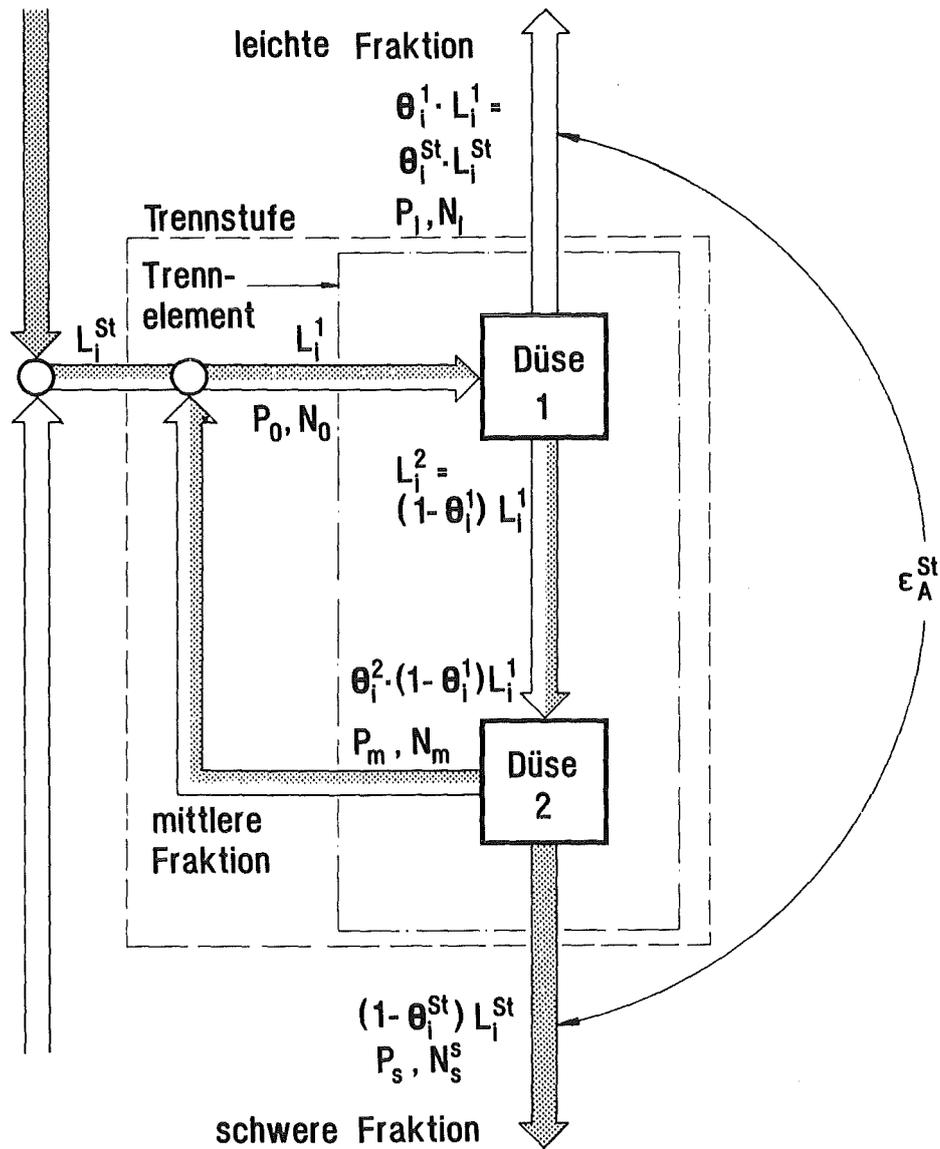
$$\epsilon_A^{St} = \frac{n_l(1 - n_s)}{n_s(1 - n_l)} - 1 \quad (5)$$

Hierbei bedeuten:

- $n_l$  =  $^{235}U$ -Molenbruch in der leichten Fraktion
- $n_s$  =  $^{235}U$ -Molenbruch in der schweren Fraktion

Die von einer Trennstufe geleistete Werterzeugung  $\delta U$  ergibt sich zu [9]:

$$\delta U = \frac{1}{2} L_u^{St} \cdot \theta_u^{St} \cdot (1 - \theta_u^{St}) \cdot (\epsilon_A^{St})^2 \quad (6)$$



**Abb. 7:** Ersatzschaltbild eines Doppelumlenksystems mit den wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung des Betriebszustandes. Die Indizes kennzeichnen:

Komponente  $i = g, u, z$ ;  $g = \text{Gemisch}$ ,  $u = \text{UF}_6$ ,  $z = \text{Zusatzgas}$   
 Trennsystem  $k = 1, 2, St$ ;  $1 = 1. \text{ Düse}$ ,  $2 = 2. \text{ Düse}$ ,  $St = \text{Stufe}$ .

Mit dem nominellen UF<sub>6</sub>-Abschälverhältnis  $\theta_u^n$  für den in die Trenndüsenstufe eintretenden UF<sub>6</sub>-Molstrom  $L_u^{St}$  wird die Art der Verschaltung der Trenndüsenstufen festgelegt. Bei der Pilot-Anlage wurde der Wert  $\theta_u^n = 1/2$  gewählt, da er zur einfachsten Verschaltung führt. Die wichtigsten Sollwerte der Betriebsgrößen der Trennelemente der Pilot-Anlage sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

|  | Stufe            | Düse          | Fraktion      |               |               |
|--|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|  |                  |               | leicht        | mittel        | schwer        |
| Druck<br>[mbar]                        | $P_{St}$<br>13,9 | $P_o$<br>34,6 | $P_l$<br>13,8 | $P_m$<br>13,8 | $P_s$<br>16,3 |
| UF <sub>6</sub> -Konz.<br>[mol %]      | $N_{St}$<br>3,0  | $N_o$<br>4,2  | $N_l$<br>1,5  | $N_m$<br>10,5 | $N_s$<br>21,6 |
| UF <sub>6</sub> -Durchsatz<br>[mmol/h] | 766              | 1340          | 383           | 574           | 383           |

Tabelle 1: Sollwerte der wichtigsten Betriebsgrößen der Trennelemente der Pilot-Anlage. Der elementare Trenneffekt beträgt  $\epsilon_A^{St} = 14,4\%$ .

### 2.3 Die Stufenkennlinie

In früheren Arbeiten wurde unter der Randbedingung eines konstanten Zusatzgastransportes gezeigt, daß bei Störungen die Drucke und Konzentrationen in den Trennstufen eindeutig miteinander gekoppelt sind. Auf der Grundlage der experimentell aufgenommenen Kennlinien, welche das Betriebsverhalten der Stufenkomponenten - Verdichter, Trennelement und Rückstauventil - beschreiben, wurde ein vereinfachtes mathematisches Modell entwickelt, mit welchem das Antwortverhalten der Trenndüsenstufe bei Änderungen des Betriebszustandes berechnet wird [10]. Von besonderem Interesse ist hierbei die Änderung des UF<sub>6</sub>-Stufenabschälverhältnisses, dessen Abhängigkeit vom UF<sub>6</sub>-Inventar  $I_u^{St}$  der Trenndüsenstufe durch die sogenannte Stufenkennlinie beschrieben wird.

In einem weiten Bereich um den Sollarbeitspunkt (\*) wird die Stufenkennlinie in guter Näherung durch einen quadratischen Ansatz beschrieben und man erhält auf den Sollarbeitspunkt normiert:

$$\theta_u^{St}/\theta_u^{St*} = 1 + G \cdot (I_u^{St}/I_u^{St*} - 1) + H \cdot (I_u^{St}/I_u^{St*} - 1)^2 \quad (7)$$

Für den UF<sub>6</sub>-Stufendurchsatz läßt sich bei gleicher Normierung die Durchsatzkennlinie in Abhängigkeit des UF<sub>6</sub>-Stufeninventares als Potenzfunktion angeben:

$$L_u^{St}/L_u^{St*} = (I_u^{St}/I_u^{St*})^{E_1} \quad (8)$$

In analoger Weise können in der Nähe des Sollbetriebspunktes für andere Betriebsgrößen der Trenndüsenstufe die Abhängigkeit vom UF<sub>6</sub>-Stufeninventar formuliert werden und man erhält z. B. für den Düsengasvordruck:

$$P_o/P_o^* = (I_u^{St}/I_u^{St*})^{E_2} \quad (9)$$

Der Verlauf der Stufenkennlinie kann experimentell an einer im Kreislauf betriebenen Stufe gemessen oder mit Hilfe der Kennfelder der Komponentenkennlinien berechnet werden. Für die Pilot-Anlage wurden beide Methoden zur Bestimmung der Stufenkennlinie benutzt. Die ermittelten Parameter sind zusammen mit der Abhängigkeit wichtiger Betriebsgrößen vom UF<sub>6</sub>-Stufeninventar in der Tabelle 2 zusammengestellt.

| normierte Betriebsgröße                  | Parameter             |
|--|-----------------------|
| UF <sub>6</sub> -Stufenabschälverhältnis | G = -0,79 H = 0,4     |
| UF <sub>6</sub> -Stufendurchsatz         | E <sub>1</sub> = 1,33 |
| Düsengasvordruck                         | E <sub>2</sub> = 0,42 |
| Düsengaskonzentration                    | E <sub>3</sub> = 0,66 |

Tabelle 2: Parameter zur Berechnung der Stufenkennlinie und wichtiger Betriebsgrößen in Abhängigkeit vom UF<sub>6</sub>-Stufeninventar.

Die Stufenkennlinie ist in der Abb. 8 dargestellt. Die erste Ableitung wird als Stufengradient  $G$  bezeichnet und besitzt im Bereich des aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen festgelegten Sollarbeitspunktes  $A$  ein negatives Vorzeichen\*). Bei einer Erhöhung des  $UF_6$ -Stufeninventares nimmt daher das  $UF_6$ -Stufenabschälverhältnis ab, und der  $UF_6$ -Molstrom in der schweren Fraktion steigt relativ stärker an als in der leichten Fraktion. Aufgrund dieser Abhängigkeit werden die bei Änderung des Betriebszustandes auftretenden  $UF_6$ -Störinventare in Richtung Kaskadenfuß transportiert und können hier akkumuliert werden. Die Transportgeschwindigkeit der  $UF_6$ -Störinventare wird durch die mittlere Verweilzeit festgelegt, welche sich aus dem Verhältnis von  $UF_6$ -Stufeninventar zum  $UF_6$ -Stufenumsatz ergibt und etwa fünf Sekunden beträgt.

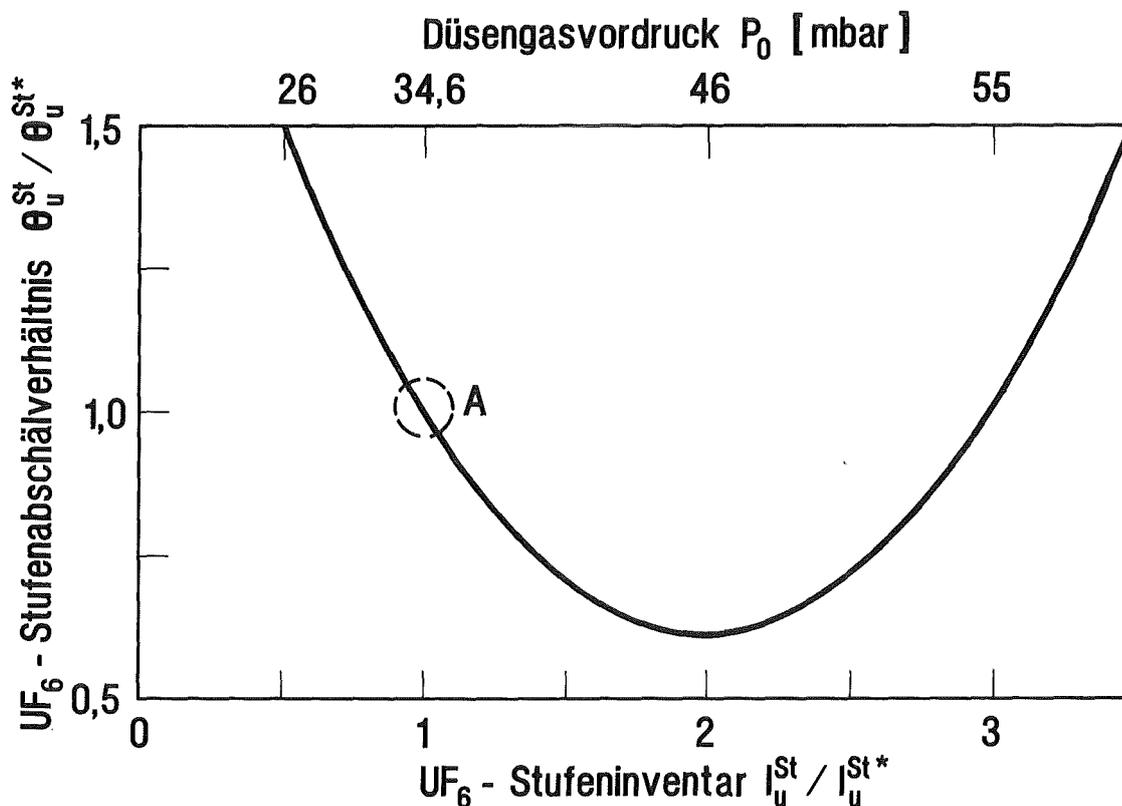


Abb. 8: Der Verlauf der Stufenkennlinie an der Pilot-Anlage. In dem aus wirtschaftlichen Überlegungen festgelegten Arbeitspunkt  $A$  besitzt die als Stufengradient bezeichnete erste Ableitung ein negatives Vorzeichen.

\*) Aus dem Verlauf der Stufenkennlinie entnimmt man, daß ein zweiter Arbeitspunkt existiert, in welchem der Stufengradient jedoch ein positives Vorzeichen besitzt. Bei unveränderter Stellung des Rückstauventiles wird dieser zweite Arbeitspunkt bei einer Verdreifachung des  $UF_6$ -Stufeninventares bzw. bei einem auf 55 mbar erhöhten Düsengasvordruck erreicht. Die früher durchgeführten Untersuchungen an der mit Einzelumlenksystemen ausgerüsteten Pilot-Anlage erfolgten wegen einer im Vergleich zum spezifischen Energieverbrauch stärkeren Bewertung der spezifischen Investierung bei einem auf dem rechten Kurvenast liegenden Arbeitspunkt, in dem  $UF_6$ -Störinventare zum Kaskadenkopf transportiert werden [11].

## 2.4 Rechenmodelle

Zur Simulation des stationären und instationären Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden wurden in früheren Arbeiten die als "Volle Simulation" und als "SCHNEL-Modell" bezeichneten Rechenmodelle entwickelt. Das als "Volle Simulation" bezeichnete Rechenmodell benutzt direkt die Kennfelder, welche das Verhalten der einzelnen Stufenkomponenten in Abhängigkeit von Druck und  $UF_6$ -Konzentration beschreiben. Hierbei wird die Trenndüsenstufe in drei Volumina eingeteilt, in welchen Druck und  $UF_6$ -Konzentration jeweils konstant und dem Düsengas sowie der leichten und schweren Fraktion zugeordnet sind [12]. Bei dem als "SCHNEL-Modell" bezeichneten Simulationsprogramm handelt es sich um ein vereinfachtes Rechenmodell, welches unter der Randbedingung eines konstanten Zusatzgastransportes entwickelt wurde. Als einziger unabhängiger Betriebsparameter wird das  $UF_6$ -Stufeninventar  $I_U^{St}$  benutzt, das die in einer Trenndüsenstufe vorhandene  $UF_6$ -Menge angibt. Der Trenndüsenstufe wird nur ein Volumen zugeordnet. Ihr Verhalten wird mit Hilfe der Stufenkennlinie und der  $UF_6$ -Durchsatzkennlinie berechnet [10]. In diese Rechenmodelle wurden die experimentell ermittelten Kennlinien der Pilot-Anlage eingeführt. Die Erweiterung der Simulationsprogramme um die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Betriebsregelung und der Vergleich der rechnerisch ermittelten Ergebnisse mit den experimentellen Daten wird jeweils in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

## 3. Einregelung in den Sollarbeitspunkt und Störungsanalyse im Kreislaufbetrieb

### 3.1 Einregelung der Trenndüsenstufen in den Sollarbeitspunkt

Die Einregelung aller zehn Trenndüsenstufen in den Sollarbeitspunkt erfolgte in einer als Kreislaufbetrieb bezeichneten Betriebsart, bei welcher durch Überbrückungsleitungen die schwere Fraktion der Fußstufe vor die Kopfstufe und deren leichte Fraktion direkt vor die Fußstufe geleitet wird (vgl. Abb. 6). Das  $UF_6$  und das Zusatzgas werden so unter Umgehung der Tieftemperaturabscheider im Kreislauf geführt, wodurch eine Akkumulierung von  $UF_6$ -Störinventar zwangsläufig unterbunden wird. Da besonders zu Beginn des Einregelvorganges sehr große  $UF_6$ -Störtransporte auftreten können, wird durch diesen Kreislaufbetrieb ein Überschreiten der zulässigen Betriebsgrenzen der Stufenverdichter verhindert.

Um die Pilot-Anlage an sehr unterschiedliche Betriebsbedingungen anpassen zu können, sind die eingesetzten Roots-Verdichter mit einem Bypassventil zwischen der Druck - und der Saugseite versehen, mit welchem das Kompressionsverhältnis in einem weiten Bereich justiert werden kann. Hierdurch können Arbeitspunkte mit sehr unterschiedlichen Expansionsverhältnissen am Trennelement eingestellt und das aufgrund von Fertigungstoleranzen z. T. stark streuende Kompressionsverhalten der Roots-Verdichter ausgeglichen werden. Die Bypassventile wurden im Kreislaufbetrieb so justiert, daß die Roots-Verdichter im Sollarbeitspunkt des Doppelumlenksystems bei einem Verdichtergegendruck von  $P_0^*$  und einer  $UF_6$ -Konzentration von  $N_0^*$  das Sollkompressionsverhältnis mit einer maximalen Abweichung von weniger als 5 % erreichen. Diese Justierung wurde bei geschlossenen Rückstauventilen durchgeführt, um die hier unerwünschte Gemischtrennung in den Stufen zu unterbinden.

Für die Einregelung der Trennstufen in den Sollarbeitspunkt wurde die Pilot-Anlage mit dem für den Kreislaufbetrieb berechneten Sollinventar des  $UF_6$  und Zusatzgases gefüllt und bei zunächst weit geöffneten Rückstauventilen betrieben. Fertigungstoleranzen der übrigen Stufenkomponenten und ungleiche Stufenvolumina bewirken zusammen mit dem sehr unterschiedlichen Kompressionsverhalten der Roots-Verdichter bei Druck- und Konzentrationsänderungen, daß sich in jeder Stufe ein individueller Betriebspunkt einstellt. Mit einer schrittweisen Halbierung der jeweils größten Abweichung des Rückstauverhältnisses  $P_3/P_1$  wird zunächst eine grobe Einregelung der  $UF_6$ -Stufenabschälverhältnisse anhand der Rückstauventile vorgenommen, wodurch eine rasche Annäherung des Düsengasvordruckes  $P_0$  und der  $UF_6$ -Konzentration  $N_0$  an die Sollwerte erreicht wird. Dieses Vorgehen nutzt das für Doppelumlenksysteme charakteristische Antwortverhalten bei Änderung des Rückstauverhältnisses aus, demzufolge sich solche Änderungen im wesentlichen auf die betroffene Stufe auswirken (vgl. 3.2).

Unter Nachregelung des  $UF_6$ -Stufenabschälverhältnisses an der Kopfstufe wird danach der Düsengasvordruck  $P_0$  stufenweise mit Hilfe der Rückstauventile auf Sollwert geregelt. Diese an der Kopfstufe beginnende Feinregelung wird gegebenenfalls wiederholt, bis das  $UF_6$ -Stufenabschälverhältnis an der Kopfstufe und der Düsengasvordruck in allen 10 Stufen innerhalb einer tolerierbaren Sollwertabweichung liegen. Mit der hier dargestellten Prozedur wurde der in der Abb. 9 gezeigte Betriebszustand innerhalb einiger Stunden erreicht, der durch eine mittlere Sollwertabweichung der Betriebsgrößen von weniger als  $\pm 2\%$  charakterisiert ist.

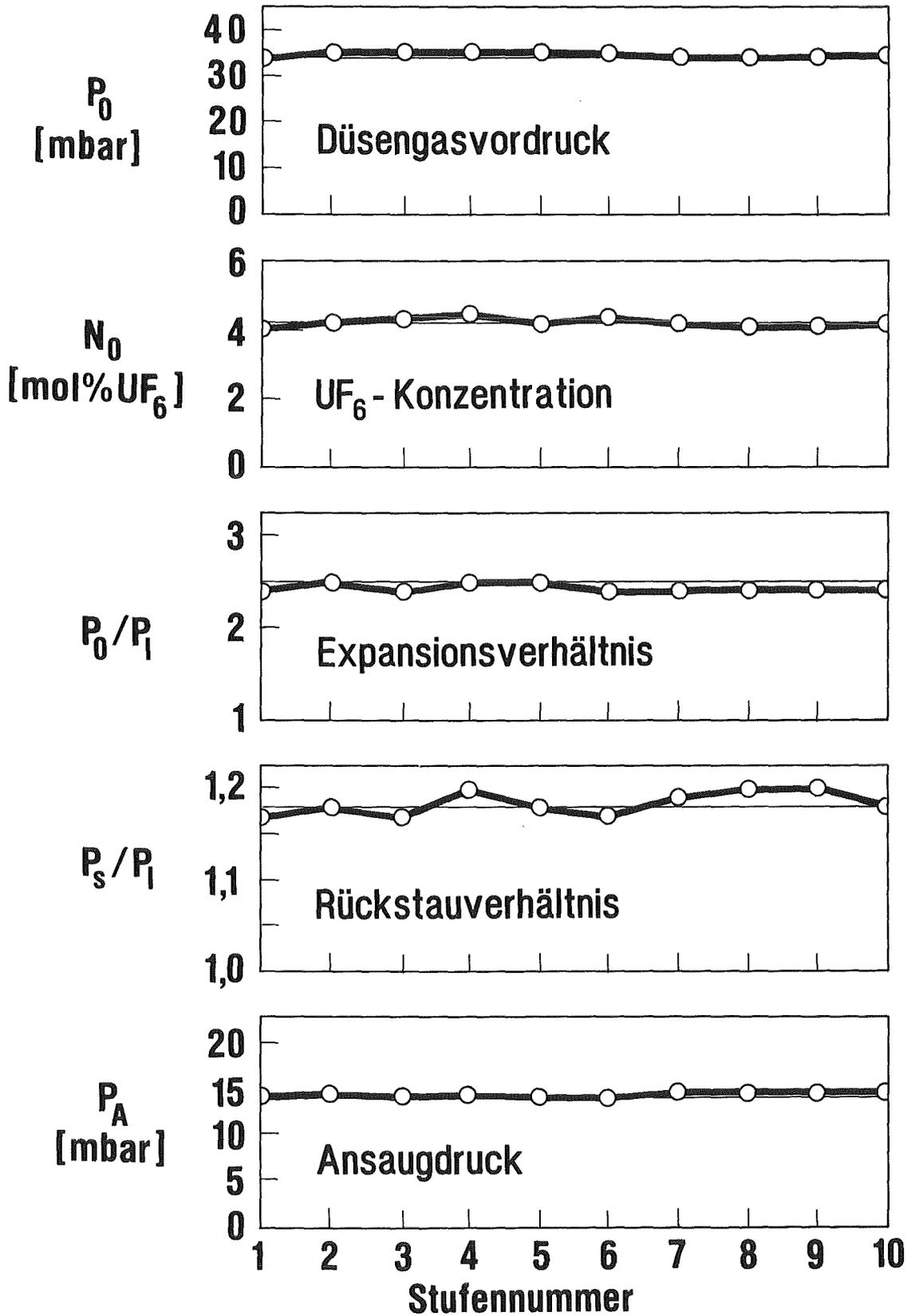


Abb. 9: Betriebszustand der Pilot-Anlage nach der Einregelung im Kreislaufbetrieb. Die mittlere Abweichung vom Sollarbeitspunkt beträgt weniger als  $\pm 2\%$ .

### 3.2 Störungsanalyse bei lokalen Störungen

Als Betriebsprofile werden die über der Stufennummer aufgetragenen Abweichungen der Betriebsgrößen gegenüber einem störungsfreien Betriebszustand bezeichnet. Sie werden in einem speziellen Unterprogramm des Kaskadenüberwachungsprogramms erstellt und können bei der Diagnose auftretender Störungen an einzelnen Stufen wichtige Hinweise über die Störursache liefern. An der Stufe Nr. 8 wurden für die beiden typischen Störungen im Rückstau- und Kompressionsverhältnis diese Betriebsprofile für die Betriebsgrößen Düsengasvordruck  $P_O$ , Düsengaskonzentration  $N_O$ , Expansionsverhältnis  $P_O/P_I$ , Rückstauverhältnis  $P_S/P_I$  und Ansaugdruck  $P_A$  aufgenommen.

Das Betriebsprofil, welches sich bei einer Reduzierung der freien Querschnittsfläche am Rückstauventil der Stufe Nr. 8 ergibt, ist in der Abb. 10 dargestellt und zeigt, daß die aufgeprägte Störung im Rückstauverhältnis sich besonders auf die betroffene Stufe auswirkt. Bei einer Abnahme der freien Querschnittsfläche am Rückstauventil dieser Stufe wird das Rückstauverhältnis erhöht und der  $UF_6$ -Durchsatz in der schweren Fraktion reduziert, während der  $UF_6$ -Durchsatz in der mittleren Fraktion entsprechend ansteigt und zu einem Anstieg der  $UF_6$ -Konzentration  $N_O$  führt. Dieser Konzentrationsanstieg führt zu einem erhöhten Kompressionsverhältnis des Roots-Verdichters und bewirkt eine Zunahme des Düsengasvordruckes und des Expansionsverhältnisses. Da das gesamte  $UF_6$ -Inventar im Kreislaufbetrieb konstant bleibt, führt der Anstieg des  $UF_6$ -Inventares in der gestörten Stufe zu einer entsprechenden Abnahme der  $UF_6$ -Inventare in den übrigen Stufen, wie die geringe und gleichmäßige Abnahme des Düsengasvordruckes und der Düsengaskonzentration in diesen Stufen zeigt.

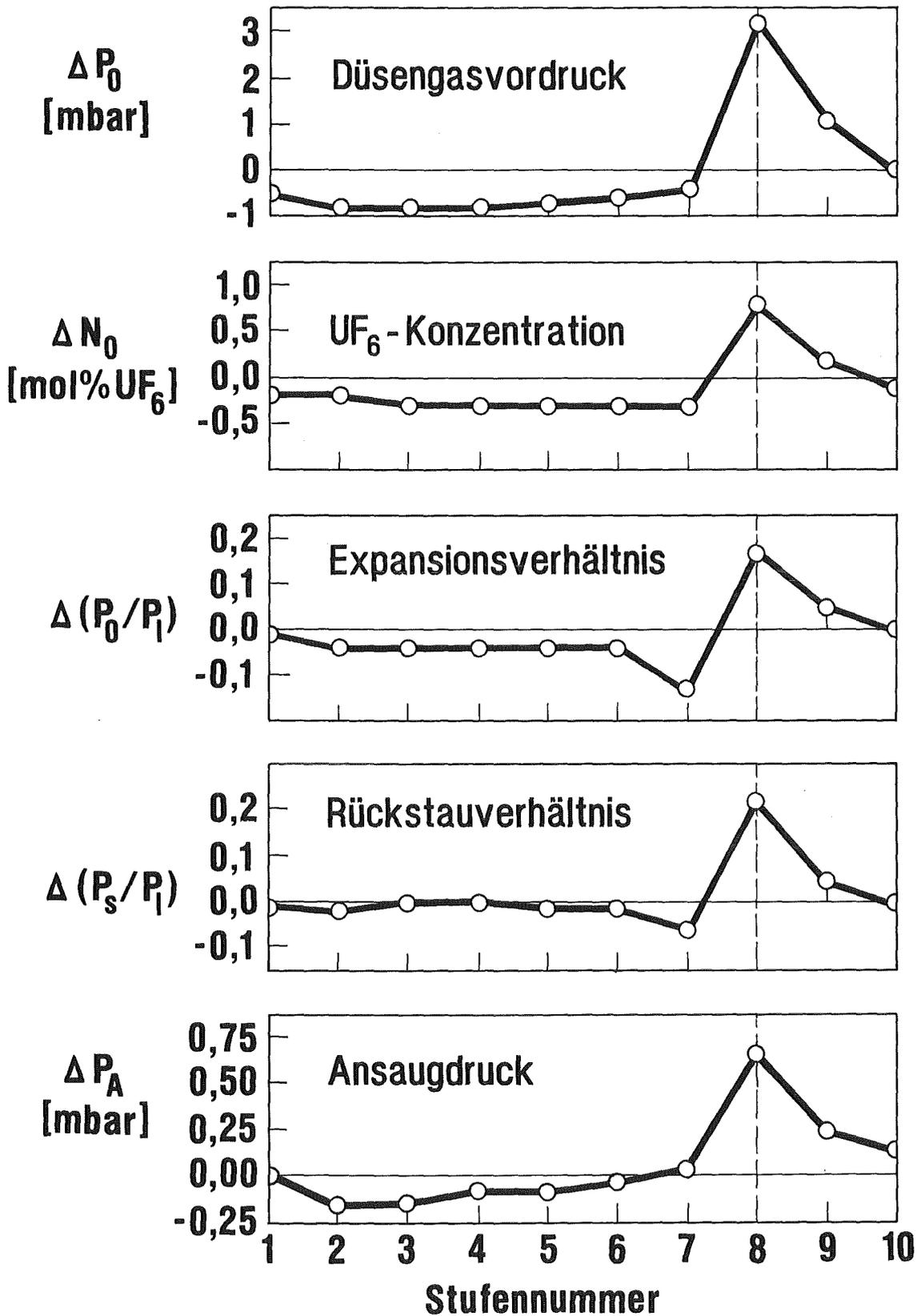


Abb. 10: Betriebsprofil einer Rückstauvorrichtung an der Stufe Nr. 8 im Kreislaufbetrieb. Durch Reduzierung der freien Querschnittsfläche am Rückstauventil wurde das Rückstauverhältnis  $P_s/P_1$  um 17 % erhöht.

Das sich aus der Abnahme des Kompressionsverhältnisses am Stufenverdichter Nr. 8 ergebende Betriebsprofil ist in der Abb. 11 als zweite typische Störung gezeigt. Die Abnahme des Kompressionsverhältnisses kann in einer technischen Trennstufe z. B. durch einen Leistungsabfall eines Verdichtermotors verursacht werden. Diese Störung läßt sich an der Pilot-Anlage durch Öffnen des Bypassventiles des betreffenden Roots-Verdichters simulieren.

Da auf die Saugseite des gestörten Verdichters (Nr. 8) drei verschiedene Fraktionen münden, werden von der Absenkung des Kompressionsverhältnisses drei Stufen (Nr. 7 bis Nr. 9) unmittelbar betroffen. Die Zunahme des Ansaugdruckes bewirkt eine Verminderung des Expansionsverhältnisses an der kaskadenabwärts gelegenen Stufe (Nr. 7) und führt so zu einem erhöhten  $UF_6$ -Strom in der leichten Fraktion dieser Stufe. An der gestörten Stufe (Nr. 8) bewirkt der erhöhte Ansaugdruck des Verdichters ein kleineres Expansionsverhältnis der mittleren Fraktion, deren  $UF_6$ -Durchsatz dadurch zunimmt. In der kaskadenaufwärts gelegenen Stufe (Nr. 9) wird durch den gestiegenen Ansaugdruck des Verdichters das Rückstauverhältnis erhöht und führt so über ein größeres  $UF_6$ -Stufenabschälverhältnis zu einem kleineren  $UF_6$ -Durchsatz in der schweren Fraktion dieser Stufe. Die Durchsatzänderungen in den drei Fraktionen kompensieren sich teilweise, so daß in der gestörten Stufe die  $UF_6$ -Konzentration und der Düsengasvordruck nahezu konstant bleiben.

Charakteristisch für diese Störung ist, daß die Abnahme des Kompressionsverhältnisses sich kaum auf die Betriebsgrößen  $P_0$  und  $N_0$  der gestörten Stufe auswirkt, jedoch bei der kaskadenaufwärts gelegenen Nachbarstufe (Nr. 9) zu einem deutlichen Anstieg der Betriebsgrößen  $P_0$  und  $N_0$  bzw. des hierzu proportionalen  $UF_6$ -Stufeninventares führt. Da im Kreislaufbetrieb das  $UF_6$ -Inventar konstant bleibt, bewirkt die Zunahme des  $UF_6$ -Inventares in der Stufe Nr. 9 eine anteilige Abnahme der  $UF_6$ -Inventare in den übrigen Stufen, so daß die Betriebsgrößen  $P_0$  und  $N_0$  in diesen Stufen abgesenkt werden.

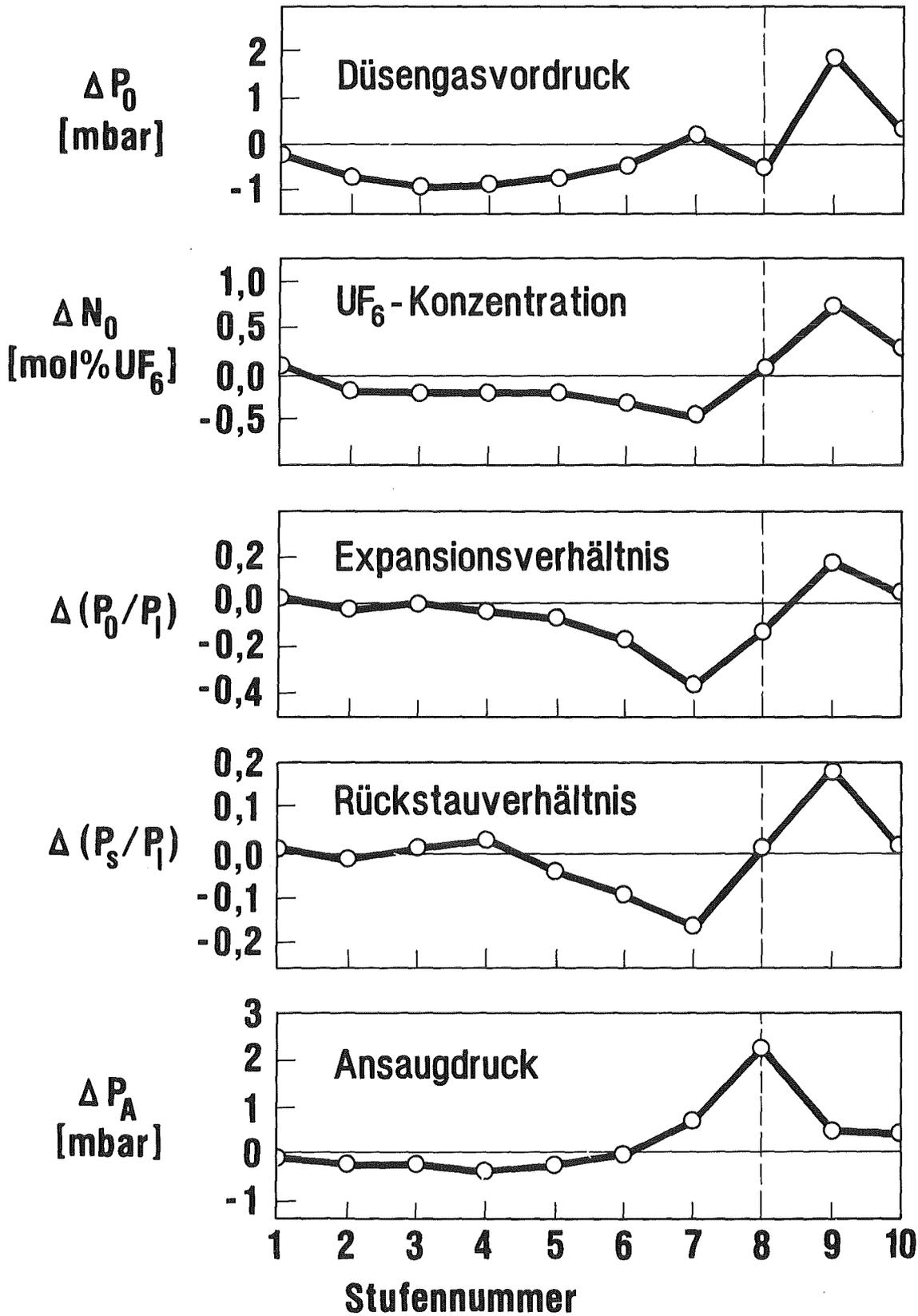


Abb. 11: Betriebsprofil einer Verdichterstörung an der Stufe Nr. 8 im Kreislaufbetrieb. Durch Öffnen des Bypassventiles wurde das Kompressionsverhältnis um -17 % reduziert.

## 4. Begründung und Realisierung der Betriebsregelung

### 4.1 Begründung der Betriebsregelung

Bei Trenndüsenkaskaden mit negativem Stufengradienten verursachen  $\text{UF}_6$ -Störinventare einen zum Kaskadenfuß gerichteten  $\text{UF}_6$ -Störtransport, dessen Auswirkung auf die gestellte Trennaufgabe davon abhängt, an welcher Stelle der Trenndüsenkaskade die Störung auftritt. Treten Störungen an Stufen innerhalb der Kaskade auf, so ergeben sich hieraus nur unterhalb der Störstelle temporär auftretende  $\text{UF}_6$ -Störtransporte, welche die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung nur geringfügig ändern. Diese temporären  $\text{UF}_6$ -Störtransporte klingen mit dem Übergang der gestörten Stufen in einen anderen stationären Arbeitspunkt rasch ab. Das zum Kaskadenfuß transportierte  $\text{UF}_6$ -Störinventar entspricht dabei der  $\text{UF}_6$ -Inventaränderung der von der Störung betroffenen Stufen. Ursache solcher temporärer  $\text{UF}_6$ -Störtransporte können Störungen im Rückstau- und Kompressionsverhältnis sein.

Bei Störungen an Stufen im Bereich des Kaskadenkopfes entsteht zunächst auch hier ein temporärer  $\text{UF}_6$ -Störtransport. Mit dem  $\text{UF}_6$ -Stufenabschälverhältnis ändert sich der  $\text{UF}_6$ -Strom in der leichten Fraktion und damit der in die Gemischtrennanlage eintretende  $\text{UF}_6$ -Strom. Da der  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom konstant ist, induziert die gestörte Stufe auch einen permanenten  $\text{UF}_6$ -Störtransport, welcher der Änderung des  $\text{UF}_6$ -Einstroms in die Tieftemperaturabscheider entspricht. Treten Betriebsstörungen an der Vorabscheidertrennstufe, am System der Tieftemperaturabscheider oder der  $\text{UF}_6$ -Rückspeisung auf, so entstehen hierdurch ebenfalls permanente  $\text{UF}_6$ -Störtransporte.

Ohne geeignete Gegenmaßnahme können die  $\text{UF}_6$ -Störtransporte durch die Akkumulierung des  $\text{UF}_6$ -Störinventares im Bereich der Fußstufen zum Erreichen der zulässigen Betriebsgrenzen der Stufenverdichter und damit zur Abschaltung durch den installierten Verdichterschutz führen. Anhand von Simulationsrechnungen wurde gezeigt, daß die Akkumulierung von  $\text{UF}_6$ -Störinventar im Bereich der Fußstufen verhindert werden kann, indem das  $\text{UF}_6$ -Inventar der Fußstufe mit Hilfe des Tails-Entnahmestromes geregelt wird. Durch diese  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung können jedoch die durch permanente  $\text{UF}_6$ -Störtransporte entstehenden Sollwertabweichungen des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten nicht beseitigt werden.

Aufgrund der im Verhältnis zum Produktstrom  $P$  großen externen  $\text{UF}_6$ -Ströme UTTA und URP führen selbst relativ kleine Änderungen dieser externen  $\text{UF}_6$ -Ströme zu großen permanenten  $\text{UF}_6$ -Störtransporten. Um diese am Kaskadenkopf durch Bilanzieren feststellen zu können, wäre hier ein hoher Aufwand für die

Meß- und Regelgenauigkeit erforderlich, während diese Änderungen anhand des Tails-Entnahmestromes  $T$  umso leichter detektiert werden können, je größer das Verhältnis von  $URP/T$  ist. Diese verstärkte Auswirkung von Störungen am Kaskadenkopf auf den Tails-Entnahmestrom kann zur Regelung des  $UF_6$ -Transportes und damit zur Einhaltung der  $^{235}U$ -Isotopenkonzentrationen in den  $UF_6$ -Entnahmeströmen genutzt werden. Da die  $UF_6$ -Inventarregelung mit Hilfe des Tails-Entnahmestromes erfolgt, kann für die  $UF_6$ -Transportregelung die Regelgröße aus dem Tails-Entnahmestrom bzw. aus der Reglerstellung der  $UF_6$ -Inventarregelung abgeleitet werden. Als Stellgröße für die  $UF_6$ -Transportregelung ist der  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom  $URP$  besonders geeignet, da er frei von Zusatzgas ist und über den  $UF_6$ -Einspeisedruck relativ genau eingestellt werden kann.

Die  $UF_6$ -Inventarregelung zur Einhaltung der zulässigen Betriebsbedingungen und die  $UF_6$ -Transportregelung zur Einhaltung des  $^{235}U$ -Isotopengradienten wurden an der 10-stufigen Pilot-Anlage realisiert und experimentell erprobt.

#### 4.2 Realisierung der $UF_6$ -Inventarregelung

Um die Pilot-Anlage als Abstreifteil einer Kaskade bei konstantem  $UF_6$ -Inventar betreiben zu können, mußten vor dem Übergang zu dieser Betriebsart die zur Tails-Entnahme notwendigen Einrichtungen installiert werden. Für die Tails-Entnahme aus der schweren Fraktion der Fußstufe wurden ein Feindosierventil mit Stellmotor und ein nachgeschalteter Tieftemperaturabscheider montiert. Durch Voruntersuchungen wurden zunächst für den Stellbereich und die Stellgeschwindigkeit des Tails-Entnahmestroms die erforderlichen Auslegungswerte festgelegt. Hierzu wurden temporäre und permanente  $UF_6$ -Störtransporte aufgeprägt und die Auslegungswerte aus dem Antwortverhalten der Fußstufe bei konstanter Stellung des Tails-Entnahmeventiles ermittelt.

Dem Rechner des on-line arbeitenden Datenerfassungssystems wurde die  $UF_6$ -Inventarregelung übertragen, welche als unterteiltes Blockdiagramm in der Abb. 12 dargestellt ist. Durch das Kaskadenüberwachungsprogramm wird der Betriebszustand jeder Stufe ermittelt. Da das  $UF_6$ -Inventar der Fußstufe als direkte Regelgröße aus den vorliegenden Meßdaten nicht bestimmt werden kann, wird als Regelgröße eine vom  $UF_6$ -Stufeninventar abhängige Betriebsgröße der Fußstufe benutzt. Als Regelgröße wird der Düsengasvordruck  $P_0$  verwendet, da die Druckmessung nahezu verzögerungsfrei ist, während die Messung der Düsengaskonzentration  $N_0$  mit einer Verzögerung von etwa 15 bis 30 s behaftet ist. Die Ansteuerung des Stellmotores erfolgt über ein parallel Input/Output-Interface, über

welches der Rechner die Steuerkommandos Drehrichtung und Betätigungsdauer an das Stellglied leitet. Diese Steuerkommandos werden in einem Unterprogramm über einen hier programmierten Geschwindigkeits-Algorithmus [13] berechnet, bei deren Ausführung die freie Querschnittsfläche des Feindosierventils und damit der Tails-Entnahmestrom geändert wird. Die Drehrichtung bestimmt das Vorzeichen der Änderung, während die Betätigungsdauer den Betrag festlegt, da der Stellmotor mit konstanter Drehgeschwindigkeit arbeitet. Der Stellbereich des Feindosierventils wird ebenfalls durch den Rechner überwacht, wobei die untere Stellgrenze so gelegt wurde, daß zum Schutz des Ventiles ein völliges Schließen verhindert wird.

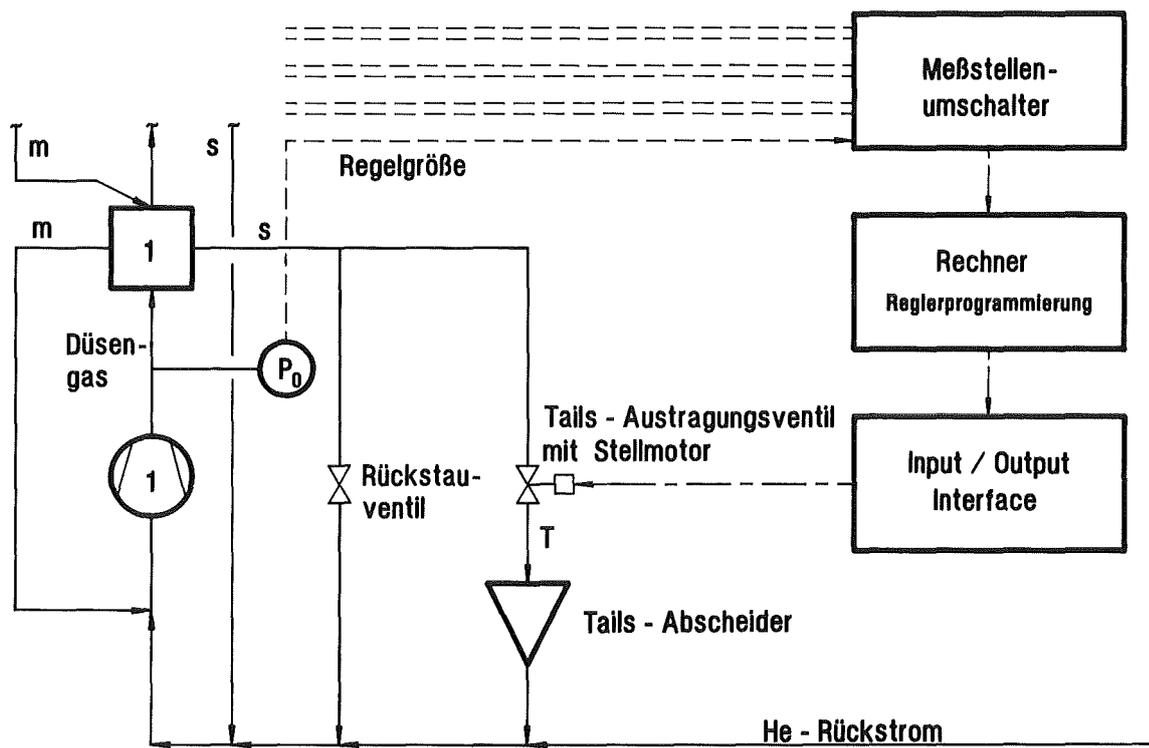


Abb. 12: Unterteiltes Blockdiagramm der UF<sub>6</sub>-Inventarregelung.

Bei technischen Trenndüsenkaskaden können  $UF_6$ -Störtransporte durch die Akkumulierung des  $UF_6$ -Störinventares im Bereich der Fußstufen zum Erreichen der zulässigen Betriebsgrenzen der Radialverdichter und damit zur Abschaltung durch den installierten Verdichterschutz führen. Um die Abschaltung der Verdichter zu verhindern, muß das Störverhalten des  $UF_6$ -Inventarreglers daher durch eine möglichst geringe Überschwingweite gekennzeichnet sein.

Obwohl bei den an der Pilot-Anlage eingesetzten Roots-Verdichtern die für Radialverdichter einzuhaltenden Betriebsgrenzen nicht bestehen, erfolgte die Anpassung der  $UF_6$ -Inventarregelung unter dieser Randbedingung. Hierdurch soll gezeigt werden, daß selbst bei massiven  $UF_6$ -Störtransporten bestimmte Betriebsgrenzen in der besonders gefährdeten Fußstufe nicht überschritten werden und die  $UF_6$ -Inventarregelung damit ein Abschalten der Verdichter durch den installierten Komponentenschutz wirksam verhindert. In diesem Sinn wurden Sollwertabweichungen von 10 % für den Düsengasvordruck  $P_0$  der Fußstufe als Betriebsgrenzen für die Roots-Verdichter festgelegt.

Bei der  $UF_6$ -Inventarregelung bildet die Fußstufe die Regelstrecke. Aus der experimentell aufgenommenen Sprungantwort bei temporären und permanenten  $UF_6$ -Störtransporten wurden erste Einstellwerte für einen proportional-integral wirkenden Regler ermittelt. Die Einstellwerte wurden durch weitere Untersuchungen des Störverhaltens angepaßt und die Regelgüte soweit verbessert, bis für die betrachteten Störungen eine Überschwingweite der Regelgröße Düsengasvordruck  $P_0$  von weniger als 5 % des Sollwertes erreicht wurde.

In der Abb. 13 ist am Beispiel eines massiven permanenten  $UF_6$ -Störtransportes das Antwortverhalten der Pilot-Anlage anhand der Düsengasvordrucke  $P_0$  dargestellt. Als Störung wurde der  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom URP um 11,2 % erhöht, was einer Zunahme des  $UF_6$ -Transportes um ca. 100 % entspricht. Aus dem zeitlichen Anstieg der Düsengasvordrucke kann man entnehmen, daß die Störung mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 Sekunden pro Stufe zum Kaskadenfuß wandert. Der Düsengasvordruck erhöht sich in den Stufen Nr. 10 bis Nr. 2 mit nahezu gleicher Zeitkonstante stationär nur um etwa 2 %, was einer Zunahme der  $UF_6$ -Stufeninventare um ca. 4 % entspricht. In der Fußstufe führt die Störung zunächst zu einem ähnlichen Anstieg, jedoch verhindert die  $UF_6$ -Inventarregelung eine weitere Akkumulierung von  $UF_6$ -Inventar und baut die Störung über den steigenden Tails-Entnahmestrom sehr schnell ab. Nach einer Überschwingweite des Düsengasvordruckes von weniger als 3 % und einer Anregelzeit von etwa 2 Minu-

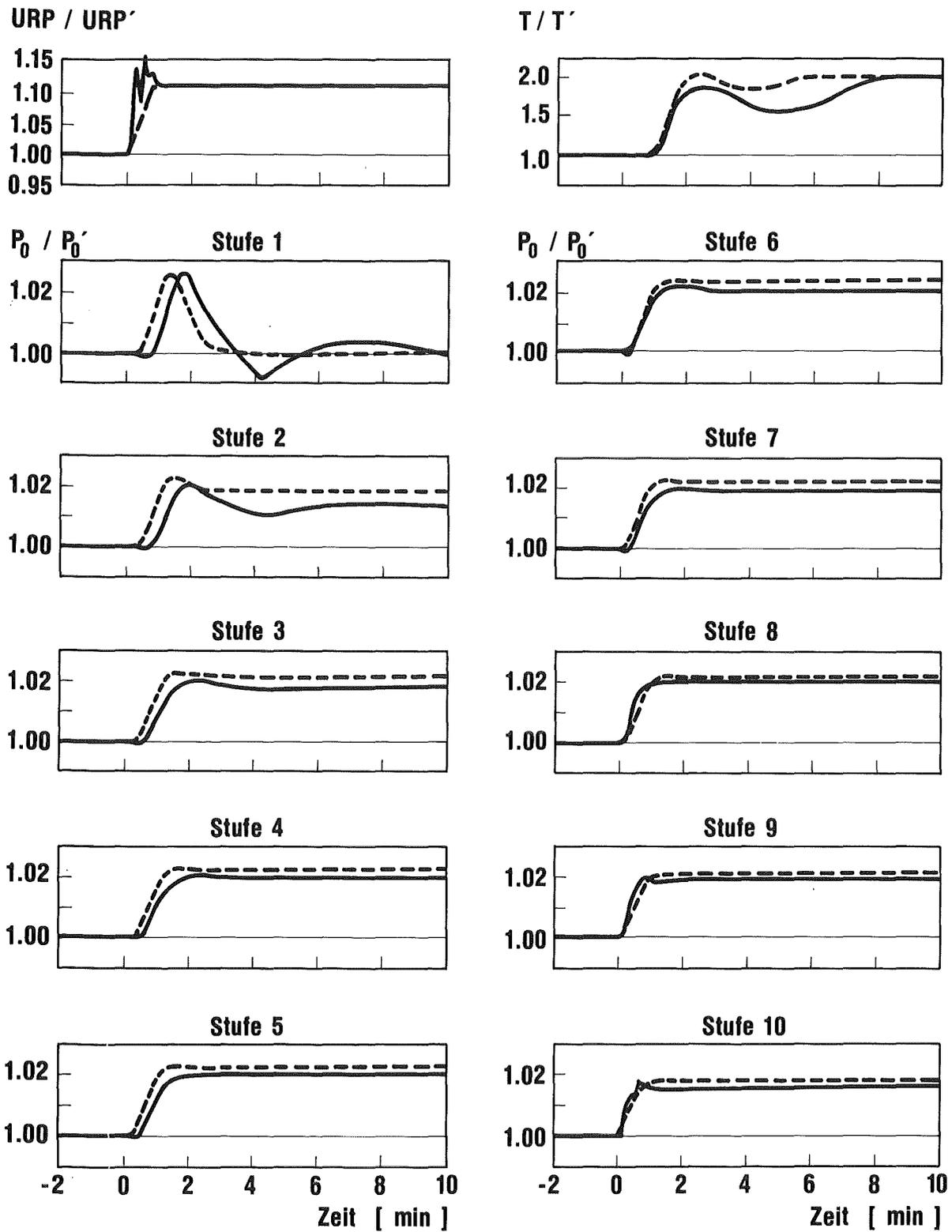


Abb. 13: Antwortverhalten der Pilot-Anlage auf einen massiven permanenten  $UF_6$ -Störtransport bei eingeschalteter  $UF_6$ -Inventarregelung nach einer Zunahme des  $UF_6$ -Kopfpufferrückstromes um 11,2 %.

— Experiment      - - - - - Modellrechnung "Volle Simulation"

ten arbeitet die Fußstufe nach ca. 9 Minuten wieder im Sollarbeitspunkt. Die UF<sub>6</sub>-Inventarregelung verhindert selbst bei dieser massiven Störung ein Überschreiten der festgelegten Betriebsgrenzen.

Das realisierte Konzept der rechnergestützten Regelung des UF<sub>6</sub>-Inventares wurde in die bestehenden Simulationsprogramme zur Berechnung des instationären Betriebsverhaltens der Versuchskaskade übernommen. Für die betrachtete Störung des UF<sub>6</sub>-Kopfpufferrückstromes URP um 11,2 % ist in der Abb. 13 das experimentelle Ergebnis und das mit der "Vollen Simulation" berechnete Antwortverhalten zusammen dargestellt. Die Abb. 13 zeigt, daß sowohl das instationäre Antwortverhalten der Stufen als auch der stationäre Betriebszustand durch das Simulationsprogramm richtig berechnet wird. Die geringfügigen Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung beruhen im wesentlichen darauf, daß im Simulationsprogramm angenommen wird, daß die Versuchskaskade aus völlig identischen Stufenkomponenten aufgebaut ist und alle Stufen vor Beginn der Störung exakt im Sollarbeitspunkt arbeiten. Diese Annahmen können von der Pilot-Anlage nur näherungsweise erreicht werden.

Bei ausgeschalteter UF<sub>6</sub>-Inventarregelung wurde für die gleiche Störung das Antwortverhalten mit der "Vollen Simulation" berechnet und in der Abb. 14 dargestellt. Der Anstieg des UF<sub>6</sub>-Kopfpufferrückstromes (Abb. 14a) bewirkt über den gestiegenen UF<sub>6</sub>-Transport nach ca. 50 Sekunden eine rasche Zunahme des Tails-Entnahmestromes T (Abb. 14b), welcher nach sechs Minuten stationär um ca. 100 % zugenommen hat. Da die freie Querschnittsfläche am Feindosierventil jetzt konstant bleibt, erhöht sich der Tails-Entnahmestrom nur über den Druckanstieg in der schweren Fraktion der Fußstufe. Der UF<sub>6</sub>-Störtransport führt daher in der Fußstufe solange zu einem Anstieg des Düsengasvordruckes P<sub>0</sub> (Abb. 14c), bis über den damit verbundenen Druckanstieg in der schweren Fraktion im stationären Betriebszustand die Zunahme des Tails-Entnahmestromes dem UF<sub>6</sub>-Störtransport entspricht. Dieser Zustand wird nach etwa 6 Minuten erreicht, wobei sich der Düsengasvordruck in der Fußstufe stationär um 30 % erhöht. Die festgelegte Betriebsgrenze wird bereits nach etwa 1,5 Minuten überschritten. Auf die übrigen Stufen wirkt sich dieser UF<sub>6</sub>-Störtransport deutlich geringer aus und führt in der Stufe Nr. 2 zu einem Druckanstieg von maximal 10 % (Abb. 14d), während in den hier nicht dargestellten übrigen Stufen der Anstieg nur etwa 2 % beträgt.

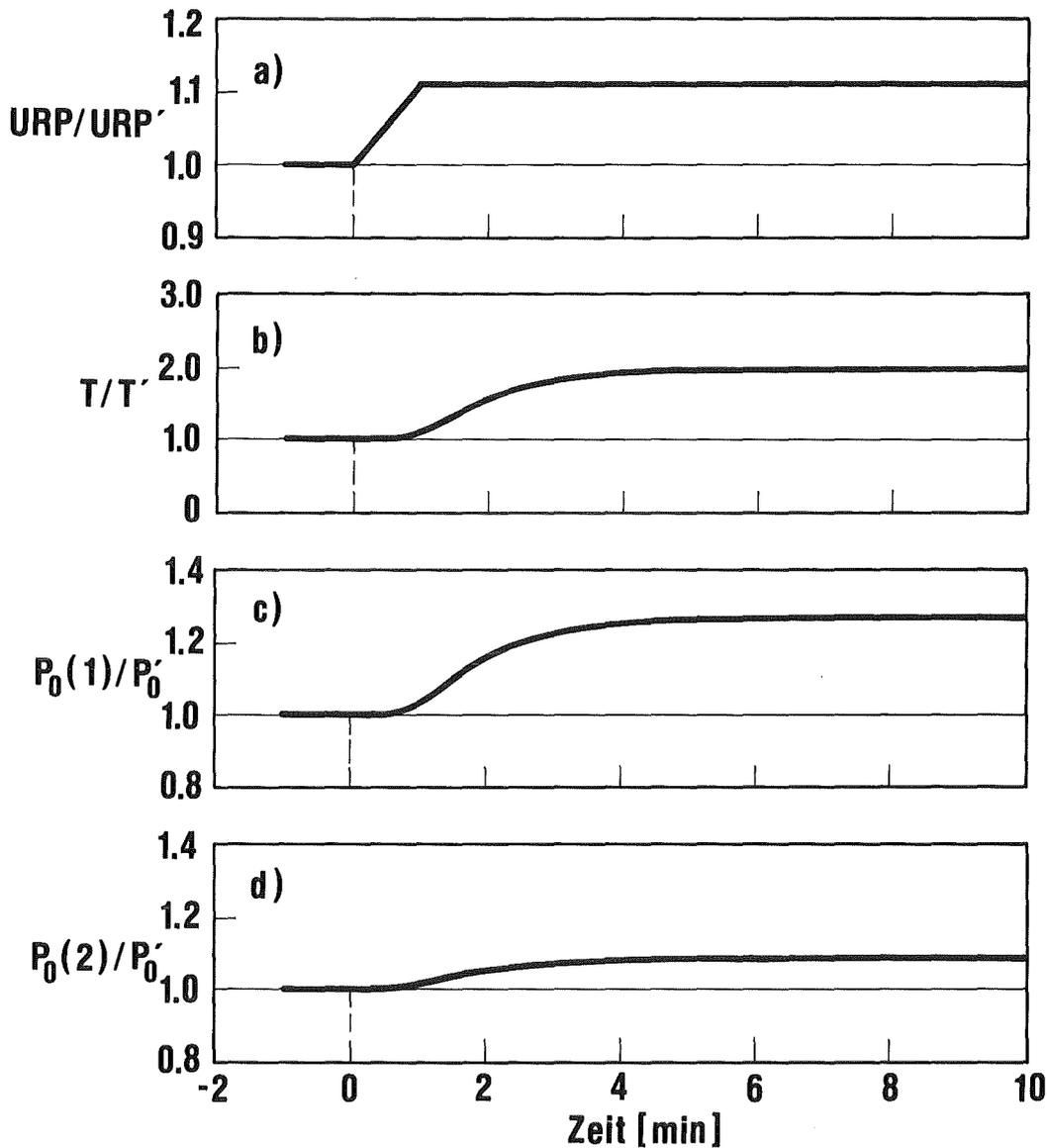


Abb. 14: Mit der "Vollen Simulation" berechnetes Antwortverhalten der Pilot-Anlage bei ausgeschalteter  $UF_6$ -Inventarregelung auf einen massiven permanenten  $UF_6$ -Störtransport nach einer Zunahme des  $UF_6$ -Kopf-pufferrückstromes um 11,2 %.

### 4.3 Realisierung der $UF_6$ -Transportregelung

Da im stationären Betriebszustand die Änderungen des  $UF_6$ -Transportes und des Tails-Entnahmestromes einander gleich sind, kann als Regelgröße für die  $UF_6$ -Transportregelung (Abb. 15) der Tails-Entnahmestrom oder eine hierzu proportionale Größe verwendet werden. An der Pilot-Anlage wurde als Regelgröße die Stellung des Feindosierventiles für den Tails-Entnahmestrom gewählt. Diese Stellung wird als Spannungssignal  $R_T$  über ein Drehpotentiometer auf der Ventilachse

ermittelt. Da die UF<sub>6</sub>-Inventarregelung die Fußstufe in ihrem Sollarbeitspunkt hält, steht somit ein zur Regelgröße proportionales Signal zur Verfügung, welches unverzögert der Änderung des Tails-Entnahmestromes folgt.

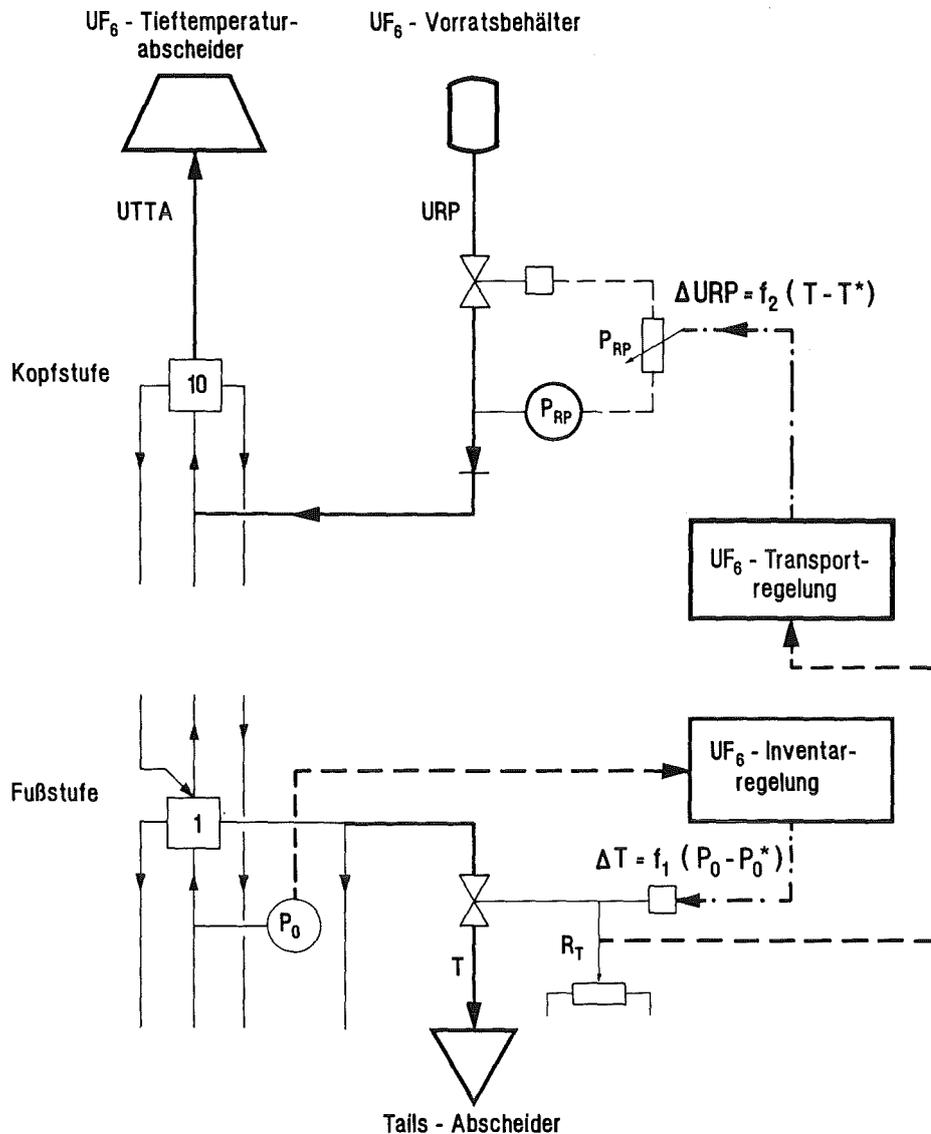


Abb. 15: Blockdiagramm der gesamten Betriebsregelung für die Pilot-Anlage.

Als Stellgröße wird der UF<sub>6</sub>-Kopfpufferrückstrom URP benutzt, dessen Größe über den UF<sub>6</sub>-Einspeisedruck  $P_{RP}$  und einer überkritischen Meßblende gemessen wird. An einem Sollwertgeber  $R_{RP}$  kann der UF<sub>6</sub>-Einspeisedruck eingestellt und in einem ausreichend großen Stellbereich verändert werden. Über das Datenerfassungssystem stehen die zur Regel- und Stellgröße proportionalen Signale zur Verfügung. Durch einen für die UF<sub>6</sub>-Transportregelung programmierten Geschwindigkeits-Algorithmus werden die zur Nachstellung des UF<sub>6</sub>-Kopfpufferrückstromes erforderlichen Steuerkommandos berechnet.

Die Pilot-Anlage ist als Abreicherungssteil einer Kaskade geschaltet. Bei dieser Betriebsart wird die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration am Kaskadenkopf durch den  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom URP aufgeprägt, während die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration am Kaskadenfuß mit abnehmendem  $\text{UF}_6$ -Transport geringer wird. Bei dieser speziellen Betriebsart hat die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung daher die Aufgabe, die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom T auf Sollwert zu halten. Für die Anpassung der  $\text{UF}_6$ -Transportregelung an die Regelstrecke, welche jetzt von der gesamten Kaskade gebildet wird, muß daher das Antwortverhalten des Tails-Entnahmestromes T und der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  bei permanenten  $\text{UF}_6$ -Störtransporten untersucht werden.

Da besonders der zeitliche Verlauf der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  nur mit erheblichem experimentellen Aufwand ermittelt werden kann, wurde das Antwortverhalten bei permanenten  $\text{UF}_6$ -Störtransporten mit Hilfe von Simulationsrechnungen ermittelt. Wie erwartet folgt die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung einem geänderten  $\text{UF}_6$ -Transport nur mit deutlicher Verzögerung. Die Ausgleichszeit für die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  liegt um einen Faktor 5 bis 10 über der Ausgleichszeit für den Tails-Entnahmestrom T, während die Verzugszeit für beide Größen etwa den gleichen Wert hat. Aus diesen Kenngrößen wurden für einen proportional-integral wirkenden Regler erste Regelparameter berechnet und die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung ihrem Aufbau entsprechend in die Simulationsprogramme eingeführt. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde das Störverhalten der  $\text{UF}_6$ -Transportregelung soweit verbessert, um bei permanenten Störungen des  $\text{UF}_6$ -Transportes von bis zu 50 % des Sollwertes Ausregelzeiten zu erreichen, welche deutlich kleiner als die jeweiligen Einstellzeiten der stationären  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung sind.

Temporäre  $\text{UF}_6$ -Störtransporte, die beispielsweise durch Störungen innerhalb der Kaskade induziert werden, führen nur zu geringen Änderungen der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung, jedoch können durch die  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung kurzzeitige und relativ große Änderungen des Tails-Entnahmestromes auftreten. Da die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung über den Tails-Entnahmestrom mit der  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung verknüpft ist, würden solche Änderungen zu unnötigen Eingriffen der  $\text{UF}_6$ -Transportregelung führen. Um solche Eingriffe weitgehend zu unterdrücken, wurde eine vom Betriebszustand der Fußstufe abhängige Schwelle programmiert, bei deren Überschreitung die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung ausgeschaltet wird. Diese Schwelle wird zweckmäßigerweise durch eine vorgegebene Regeldifferenz von ca. 2 % des Düsengasvordruckes der Fußstufe festgelegt.

Das Einschalten der UF<sub>6</sub>-Transportregelung erfolgt somit nur, wenn die Fußstufe nahe ihrem Sollarbeitspunkt arbeitet. Man erreicht auf diese Weise, daß die UF<sub>6</sub>-Transportregelung im wesentlichen nur auf permanente UF<sub>6</sub>-Störtransporte reagiert. Diese mit Hilfe von Simulationsrechnungen konzipierte UF<sub>6</sub>-Transportregelung wurde an der Pilot-Anlage realisiert und somit die Betriebsregelung vollständig installiert.

#### 4.4 Gasdynamische Erprobung der Betriebsregelung

Mit der gasdynamischen Erprobung der Betriebsregelung an der Pilot-Anlage war zunächst zu zeigen, daß bei permanenten UF<sub>6</sub>-Störtransporten sowohl eine ausreichende Entkopplung zwischen der UF<sub>6</sub>-Inventarregelung und der UF<sub>6</sub>-Transportregelung erreicht wird als auch die geforderten Ausregelzeiten für den UF<sub>6</sub>-Transport eingehalten werden.

Das experimentell ermittelte Antwortverhalten bei eingeschalteter Betriebsregelung ist in der Abb. 16 am Beispiel eines permanenten UF<sub>6</sub>-Störtransportes dargestellt, welcher durch eine Vergrößerung der freien Querschnittsfläche am Rückstauventil der Kopfstufe induziert wurde. Mit der Abnahme des Rückstauverhältnisses  $R = P_3/P_1$  (Abb. 16a) um -7,7 % zum Zeitpunkt  $t = 0$  verringert sich das UF<sub>6</sub>-Stufenabschälverhältnis, wodurch der UF<sub>6</sub>-Einstrom UTTA in die Tieftemperaturabscheider am Kaskadenkopf um  $-\Delta UTTA$  abnimmt. Da der UF<sub>6</sub>-Kopfpufterückstrom URP (Abb. 16b) zunächst konstant bleibt, steigt von der Kopfstufe ausgehend der UF<sub>6</sub>-Durchsatz der schweren Fraktion in den kaskadenabwärts gelegenen Stufen ebenfalls um  $\Delta UTTA$  an. Nach etwa einer Minute hat der so induzierte permanente UF<sub>6</sub>-Störtransport die Fußstufe erreicht, deren Betriebszustand aus dem Verlauf des Düsengasvordruckes  $P_0$  (Abb. 16c) hervorgeht. Da die UF<sub>6</sub>-Inventarregelung bei dieser Störung die Fußstufe stets nahe dem Sollarbeitspunkt hält, bleibt die UF<sub>6</sub>-Transportregelung eingeschaltet und reagiert unmittelbar auf den steigenden Tails-Entnahmestrom, (Abb. 16d) mit einer langsamen Reduzierung des UF<sub>6</sub>-Kopfpufterückstromes. Der Verlauf des Tails-Entnahmestromes zeigt, daß nach einer Ausregelzeit von etwa sieben Minuten der UF<sub>6</sub>-Transport den eingestellten Wert vor der Störung wieder erreicht hat, wobei der UF<sub>6</sub>-Kopfpufterückstrom stationär um - 5 % zurückgenommen wurde.

Die Rückstaustörung wurde nach acht Minuten wieder beseitigt, so daß der UF<sub>6</sub>-Einstrom UTTA in die Tieftemperaturabscheider wieder auf den Wert vor der Störung ansteigt. Der UF<sub>6</sub>-Transport bzw. der Tails-Entnahmestrom nehmen daher

zunächst ab. Für die Ausregelung dieser induzierten  $\text{UF}_6$ -Transportstörung ergibt sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf. Da das Feindosierventil an der unteren Stellgrenze stets etwas geöffnet bleibt, wird in diesem Stellbereich noch Tails-Strom entnommen, wodurch die Ausregelzeiten und die Überschwingweiten größer werden.

Die erreichten Ausregelzeiten betragen etwa 25 % der anhand von Simulationsrechnungen ermittelten Einstellzeit der stationären  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung und lassen erwarten, daß durch die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung bei induzierten  $\text{UF}_6$ -Störtransporten nur geringe Abweichungen der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration im Tails-Entnahmestrom auftreten werden.

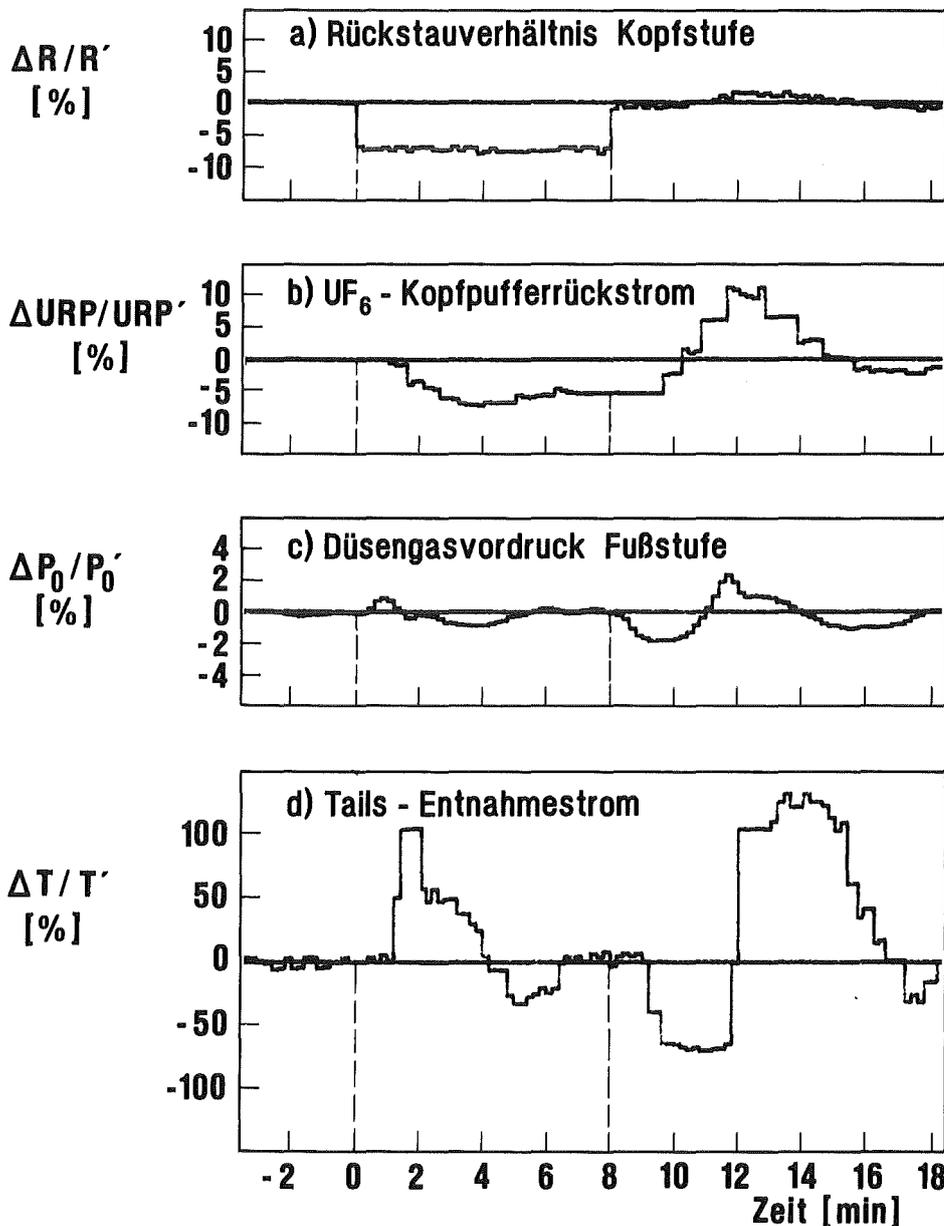


Abb. 16: Experimentell ermitteltes Antwortverhalten bei induziertem  $\text{UF}_6$ -Störtransport und eingeschalteter Betriebsregelung.

## 5. Einhaltung des $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten durch die $\text{UF}_6$ -Transportregelung

Da die Pilot-Anlage als Abstreifteil einer Kaskade geschaltet ist, wird die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration an der Kopfstufe durch den  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom URP aufgeprägt und ändert sich mit dem  $\text{UF}_6$ -Transport  $\tau_U$  nur unwesentlich. Im Abstreifteil wird die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom T mit abnehmendem  $\text{UF}_6$ -Transport geringer. Die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung hat bei dieser Schaltung daher die Aufgabe, die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  und den hierdurch bestimmten  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten auf einem vorgegebenen Wert zu halten.

Die Erfüllung dieser Aufgabe wird für den stationären Betriebszustand anhand der gemessenen Abhängigkeit des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten und für den instationären Betriebszustand am Beispiel einer Simulationsrechnung gezeigt.

### 5.1 Experimentelle Bestimmung des stationären $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten in Abhängigkeit vom $\text{UF}_6$ -Transport

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  erfolgte die Variation des  $\text{UF}_6$ -Transportes in einer ersten Meßreihe direkt durch Änderung des  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstromes URP. In einer zweiten Meßreihe wurde der  $\text{UF}_6$ -Transport variiert, indem bei konstantem  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom durch Änderungen des Rückstau- bzw. des Kompressionsverhältnisses an den Stufen Nr. 9 bzw. Nr. 10 ein geänderter  $\text{UF}_6$ -Einstrom UTTA in die Tieftemperaturabscheider am Kaskadenkopf induziert wurde. Während der Messungen war nur die  $\text{UF}_6$ -Inventarregelung eingeschaltet. Im stationären Betriebszustand entspricht der Tails-Entnahmestrom dem  $\text{UF}_6$ -Transport, dessen Größe durch Wiegen des abgeschiedenen Tails-Entnahmestromes gemessen wurde. Bei der Bestimmung der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  wurde ein Massenspektrometer mit Doppelaufhängern und spezieller Elektronik für die Verhältnissbildung der Ionenströme benutzt [14].

In der Abb. 17 ist die gemessene  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  über dem  $\text{UF}_6$ -Transport aufgetragen, welcher auf den Sollwert des  $\text{UF}_6$ -Stufendurchsatzes  $U_{St}^*$  normiert wurde. Bei der massenspektrometrischen Bestimmung der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration des Tails-Entnahmestromes wurde zum Vergleich stets eine

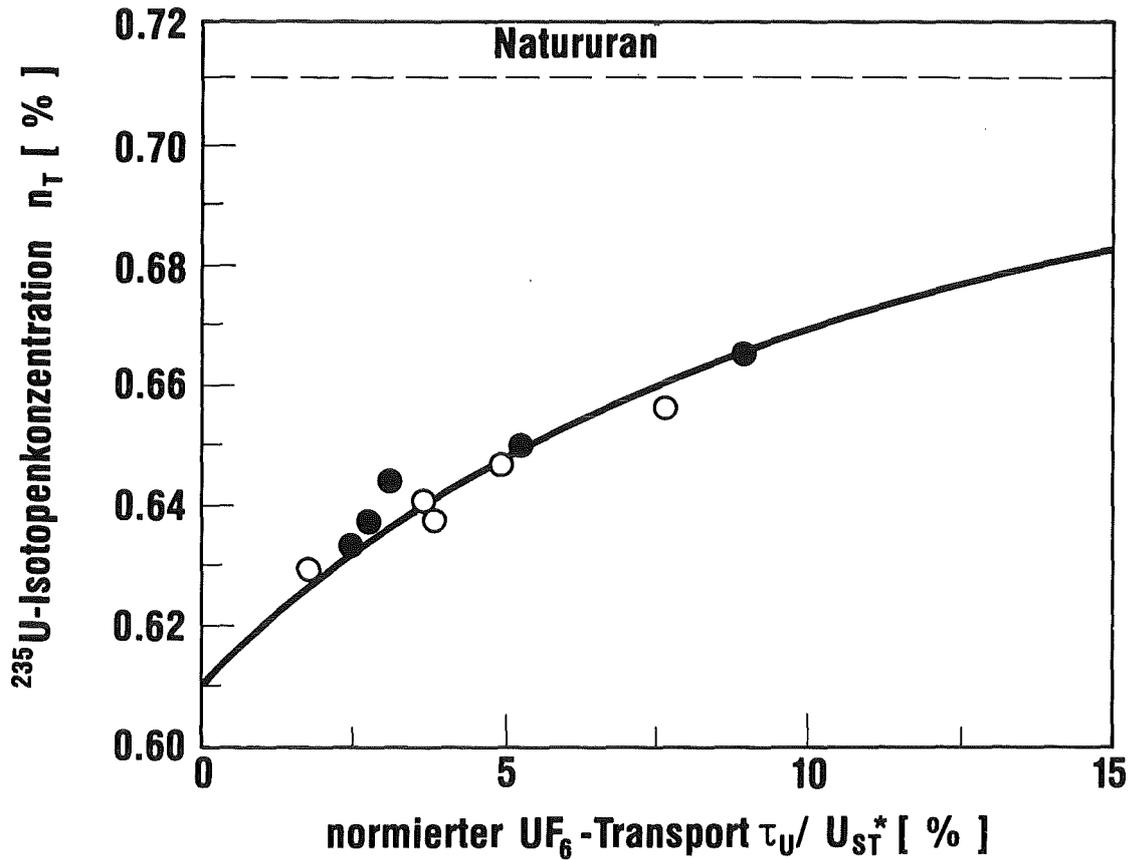


Abb. 17: Abhängigkeit der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  vom auf den  $\text{UF}_6$ -Stufendurchsatz  $U_{st}^*$  normierten  $\text{UF}_6$ -Transport  $\tau_U$  im stationären Betriebszustand.

In der 1. Meßreihe (Symbol ●) wurde der  $\text{UF}_6$ -Transport durch den  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom und in der 2. Meßreihe (Symbol ○) durch Änderung des Betriebszustandes an den Stufen Nr. 9 und Nr. 10 variiert. Die durchgezogene Kurve gibt den theoretischen Verlauf wieder.

Probe aus dem  $\text{UF}_6$ -Kopfpuffer mit der natürlichen Isotopenkonzentration benutzt. Zum Vergleich ist der theoretische Verlauf der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration eingetragen, welcher mit Hilfe der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenbilanzen für den stationären Zustand iterativ berechnet wurde.

Die Pilot-Anlage arbeitet bei dieser Variation des  $\text{UF}_6$ -Transportes im Mittel bei unterschiedlichen Arbeitspunkten, woraus sich geringfügige Änderungen des elementaren Trenneffektes in den einzelnen Stufen ergeben. Aus Messungen des Elementareffektes der Isotopentrennung in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen konnte jedoch abgeschätzt werden, daß dieser Einfluß auf die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration des Tails sehr gering ist. Die Meßwerte aus der Variation des  $\text{UF}_6$ -Transportes durch den  $\text{UF}_6$ -Kopfpufferrückstrom (Symbol ●) bzw. durch die Ände-

rungen des Betriebszustandes an den Stufen Nr. 9 und Nr. 10 (Symbol o) weisen gegenüber dem theoretischen Verlauf keine systematische Abweichung auf. Bei einer Standardabweichung von 0,15 ‰  $^{235}\text{U}$  sind die Messungen in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Werten.

Für den stationären Betriebszustand belegen die durchgeführten Messungen, daß über den als Stellgröße der  $\text{UF}_6$ -Transportregelung dienenden  $\text{UF}_6$ -Kopfpuflerrückstrom URP die durch Fehleinstellungen an Stufen in der Nähe des Kaskadenkopfes verursachten Änderungen des  $\text{UF}_6$ -Transportes und des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten beseitigt werden können.

Prinzipiell könnte der  $\text{UF}_6$ -Einstrom UTTA in die Tieftemperaturabscheider am Kaskadenkopf als Stellgröße für den  $\text{UF}_6$ -Transport benutzt werden. An der Pilot-Anlage würde dann als Stellglied das Rückstauventil der Kopfstufe dienen. Da das Rückstauventil einen begrenzten Stellbereich und eine nicht lineare Kennlinie besitzt, erscheint die Regelung des  $\text{UF}_6$ -Transportes mit dem  $\text{UF}_6$ -Einstrom UTTA als Stellgröße weniger geeignet.

## 5.2 Berechnung des instationären Verlaufes des $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten

Erwartungsgemäß liefern die in Kapitel 2.4 beschriebenen instationären Simulationsprogramme für die durchgeführte Variation des  $\text{UF}_6$ -Transportes im stationären Betriebszustand dieselbe quantitative Abhängigkeit der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$ . Da auch das stationäre und instationäre gasdynamische Betriebsverhalten richtig wiedergegeben werden, kann man daher erwarten, daß die Simulationsprogramme auch die experimentell schwer meßbare instationäre  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung richtig beschreiben.

Der hier interessierende instationäre Verlauf der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom und des zeitlichen Mittelwertes  $\bar{n}_T$  im Tails-Abscheider bei induziertem  $\text{UF}_6$ -Störtransport wird daher anhand einer mit dem "SCHNEL-Modell" durchgeführten Simulationsrechnung gezeigt.

In der Rechnung wurde für den störungsfreien Betriebszustand der  $\text{UF}_6$ -Transport  $\tau$  auf 2 ‰ des Sollwertes des  $\text{UF}_6$ -Stufendurchsatzes  $U_{St}^*$  eingestellt und als Störung eine Reduzierung des Rückstauverhältnisses um -7,3 ‰ an der Kopfstufe gewählt. In der Abb. 18 ist das berechnete instationäre Betriebsverhalten als Änderung gegenüber dem ungestörten Betriebszustand dargestellt.

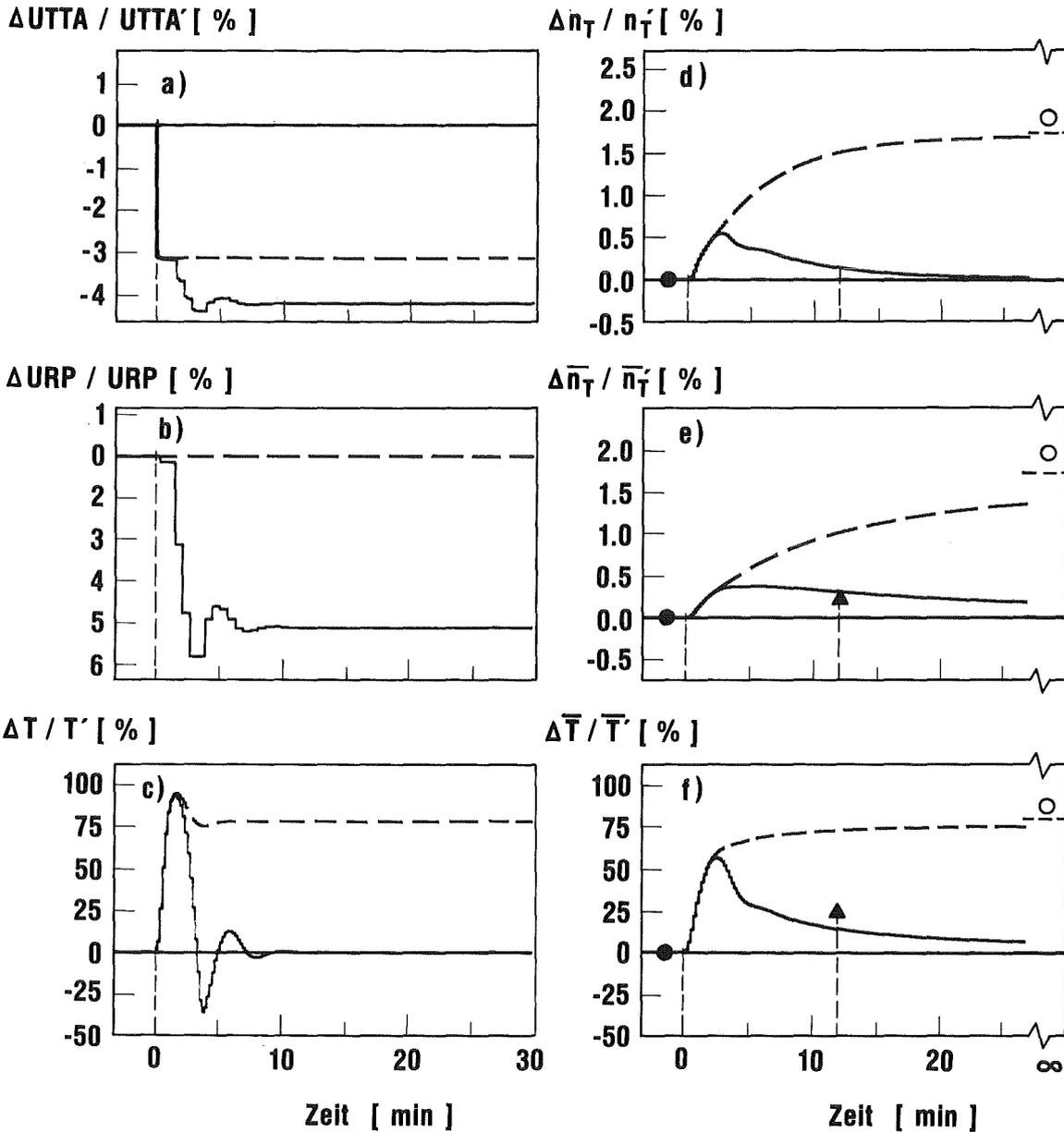


Abb. 18: Mit dem "SCHNEL-Modell" berechneter zeitlicher Verlauf einer  $UF_6$ -Transportstörung, die durch Reduzierung des Rückstauverhältnisses um -7,3 % an der Kopfstufe induziert wurde. Die durchgezogenen Kurven geben den Verlauf mit eingeschalteter  $UF_6$ -Transportregelung wieder, während die gestrichelt eingetragenen Kurven dem Verlauf bei ausgeschalteter  $UF_6$ -Transportregelung entsprechen.

Die eingetragenen Symbole kennzeichnen folgende Meßwerte:

- = ungestörter Betriebszustand
- ▲ = induzierter  $UF_6$ -Störtransport bei eingeschalteter  $UF_6$ -Transportregelung
- = induzierter  $UF_6$ -Störtransport bei ausgeschalteter  $UF_6$ -Transportregelung

Mit der Reduzierung des Rückstauverhältnisses an der Kopfstufe zum Zeitpunkt  $t = 0$  sinkt der  $UF_6$ -Einstrom UTTA in die Tieftemperaturabscheider um -3 % (Abb. 18a). Da ohne die  $UF_6$ -Transportregelung (gestrichelte Kurven) der  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom URP (Abb. 18b) konstant bleibt, führt diese relativ geringe Abnahme von UTTA zu einem relativ starken Anstieg des  $UF_6$ -Transportes. Die  $UF_6$ -Inventarregelung reagiert auf den induzierten  $UF_6$ -Störtransport mit einer schnellen Erhöhung des  $UF_6$ -Tails-Entnahmestromes T (Abb. 18c). Aus dem Verlauf des Tails-Entnahmestromes entnimmt man, daß dieser nach etwa 2,5 Minuten bereits 90 % seines stationären Endwertes erreicht hat. Im gasdynamisch stationären Betriebszustand bewirkt die betrachtete Reduzierung des Rückstauverhältnisses an der Kopfstufe eine Zunahme des  $UF_6$ -Transportes um 75 %.

Mit dem induzierten  $UF_6$ -Störtransport steigt die  $^{235}U$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  (Abb. 18d) im Tails-Entnahmestrom zunächst relativ rasch an und erreicht nach ca. 16 Minuten 90 % des stationären Wertes. Gegenüber dem störungsfreien Betriebszustand bewirkt der  $UF_6$ -Störtransport eine stationäre Zunahme der  $^{235}U$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom um relativ 1,7 %, was einer Abnahme des  $^{235}U$ -Isotopengradienten um -13 % entspricht.

Durch Aufsummieren des Tails-Entnahmestromes T und seines  $^{235}U$ -Isotopenstromes  $n_T \cdot T$  wurde die abgeschiedene  $UF_6$ -Menge  $\bar{T}$  und deren mittlere  $^{235}U$ -Isotopenkonzentration  $\bar{n}_T$  berechnet, wobei der Tails-Abscheider zu Beginn der Störung als leer angenommen wurde. Die mittlere  $^{235}U$ -Isotopenkonzentration  $\bar{n}_T$  (Abb. 18e) des  $UF_6$ -Inhaltes im Tails-Abscheider steigt langsamer als die  $^{235}U$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom an und erreicht erst 60 Minuten nach Beginn der Störung 90 % des stationären Wertes. Der  $UF_6$ -Inhalt  $\bar{T}$  (Abb. 18f) im Tails-Abscheider steigt mit dem induzierten  $UF_6$ -Störtransport zunächst rasch an und erreicht bereits nach acht Minuten 90 % des stationären Wertes.

Für den gleichen induzierten  $UF_6$ -Störtransport geben die durchgezogenen Kurven den berechneten Verlauf mit eingeschalteter  $UF_6$ -Transportregelung wieder. Mit dem reduzierten Rückstauverhältnis an der Kopfstufe nimmt der  $UF_6$ -Einstrom UTTA (Abb. 18a) zunächst ebenfalls um -3 % ab. Die  $UF_6$ -Transportregelung reduziert den  $UF_6$ -Kopfpufferrückstrom URP (Abb. 18b) innerhalb von vier Minuten um -5 % und beseitigt so den induzierten  $UF_6$ -Störtransport. Aus dem Verlauf des  $UF_6$ -Tails-Entnahmestromes T (Abb. 18c) erkennt man, daß nach etwa zehn Minuten der Tails-Entnahmestrom und damit der  $UF_6$ -Transport den Wert des störungsfreien Betriebszustandes erreichen.

Die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  (Abb. 18d) im Tails-Entnahmestrom T ändert sich zunächst mit der gleichen Zeitkonstante wie bei ausgeschalteter  $\text{UF}_6$ -Transportregelung. Nach drei Minuten erreicht die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  eine maximale Abweichung von 0,5 % relativ und nähert sich dann wieder langsam dem ungestörten Wert an. Für die mittlere Isotopenkonzentration  $\bar{n}_T$  (Abb. 18e) der  $\text{UF}_6$ -Menge T im zu Beginn der Störung leeren Tails-Abscheider ergibt sich ein ähnlicher Verlauf wie für die momentane  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  im Tails-Entnahmestrom, jedoch ist die maximale Abweichung kleiner und die Zeitkonstante größer (Abb. 18e). Zu Beginn der Störung steigt die  $\text{UF}_6$ -Menge  $\bar{T}$  (Abb. 18f) im Tails-Abscheider zunächst mit der Zunahme des Tails-Entnahmestromes T rasch an, um sich nach einer maximalen Abweichung von 55 % langsam dem Sollwert zu nähern.

Das mit dem SCHNEL-Modell berechnete Antwortverhalten zeigt, daß ausreichend kurze Ausregelzeiten erreicht werden, so daß im wesentlichen nur während der Ausregelzeit der  $\text{UF}_6$ -Transportstörung ein geänderter  $^{235}\text{U}$ -Isotopenstrom abgeschieden wird. Da der Tails-Abscheider zu Beginn der  $\text{UF}_6$ -Transportstörung als leer angenommen wurde, entspricht der Verlauf der mittleren  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $\bar{n}_T$  der  $\text{UF}_6$ -Menge im Tails-Abscheider einer oberen Grenze der Störauswirkung.

Der zeitliche Verlauf der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration kann experimentell nur mit erheblichem Aufwand bestimmt werden, da für die massenspektrometrische Auswertung eine ausreichende Menge an  $\text{UF}_6$  erforderlich ist. Während der  $\text{UF}_6$ -Transportstörung kann diese Menge an  $\text{UF}_6$  gesammelt und deren mittlere  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration gemessen werden. Für die hier behandelte  $\text{UF}_6$ -Transportstörung wurde an der Pilot-Anlage während der Ausregelzeit für 12 Minuten der Tails-Entnahmestrom gesammelt und die sich ergebende mittlere  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $\bar{n}_T$  gemessen. Diese Messung sowie die experimentellen Werte der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration im störungsfreien Betriebszustand bzw. im stationären Betriebszustand bei induziertem  $\text{UF}_6$ -Störtransport und ausgeschalteter  $\text{UF}_6$ -Transportregelung sind in der Abb. 18 eingetragen.

Die Meßwerte und das berechnete Antwortverhalten belegen, daß mit der realisierten  $\text{UF}_6$ -Transportregelung auch bei induzierten  $\text{UF}_6$ -Störtransporten nur während der Ausregelzeit geringe Änderungen des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten auftreten. Im Rahmen der Meßgenauigkeit zeigen Messung und Simulationsrechnung auch für die instationäre  $^{235}\text{U}$ -Isotopenverteilung eine gute Übereinstimmung.

## 6. Diskussion der Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurde die anhand von Simulationsrechnungen getroffene Aussage [4] experimentell bestätigt, daß an einzelnen Stufen auftretende Störungen bei Kaskaden mit Doppelumlenksystemen wesentlich stärker als bei Kaskaden mit Einfachumlenksystemen lokalisiert sind. Die aufgenommenen Störungsprofile zeigen, daß eine Unterscheidung zwischen einer Störung im Rückstauverhältnis und einer Störung im Kompressionsverhältnis anhand der unterschiedlichen Lage der maximalen Abweichung des Düsengasvordrucks und des Ansaugdrucks des Verdichters möglich ist.

Die in der vorliegenden Arbeit eingeführte Betriebsregelung zur Stabilisierung der  $\text{UF}_6$ -Verteilung und des  $^{235}\text{U}$ -Isotopengradienten wurde an einer als Abstreifkaskade arbeitenden Trenndüsenanlage experimentell erprobt. Die Betriebsregelung benutzt als Stellgröße den  $\text{UF}_6$ -Pufferrückstrom am Kaskadenkopf, mit dem ein vorher festgelegter Tails-Strom unter Einhaltung der vorgesehenen Betriebsbedingungen der Fußstufe konstant gehalten wird. Die Anforderungen an die Meß- und Regelgenauigkeit werden umso höher, je kleiner das Verhältnis von Entnahmestrom zu Kaskadenumlaufstrom, d. h. je größer die Stufenzahl ist.

Bei einer technischen Trenndüsenanlage liegt die Gesamtstufenzahl um mehr als eine Größenordnung über der Stufenzahl der Pilot-Anlage. Die Betriebsregelung wird dann nicht nur die Konstanthaltung des Produkt- und Tails-Stromes innerhalb bestimmter Fehlergrenzen sowie die Einhaltung der Betriebsbedingungen zur Aufgabe haben, sondern den Produkt- und Tails-Strom unter Einbeziehung des Feed-Stromes so regeln, daß die gewünschten Isotopenkonzentrationen bei vorgegebenen Betriebsbedingungen eingehalten werden.

Die diesen Anforderungen entsprechende Betriebsregelung ist in Abb. 19 dargestellt. Im Sollarbeitspunkt ist die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_p^*$  des in die Tieftemperaturabscheider eintretenden  $\text{UF}_6$ -Stromes gleich der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $\bar{n}_p^*$  des Produktstromes. Die  $^{235}\text{U}$ -Isotopenregelung im Anreicherungs teil ermittelt aus einer Sollwertabweichung der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_p$  für die  $\text{UF}_6$ -Transportregelung einen geänderten Sollwert  $T^*$ . Durch eine schrittweise Korrektur der Führungsgröße  $T^*$  der  $\text{UF}_6$ -Transportregelung kann somit die Auswirkung systematischer Fehler bzw. eines geänderten Trennverhaltens auf die  $^{235}\text{U}$ -Produktkonzentration  $\bar{n}_p$  beseitigt werden. Im Abreicherungs teil wird die Einhaltung der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T^*$  im Tails-Entnahmestrom dadurch

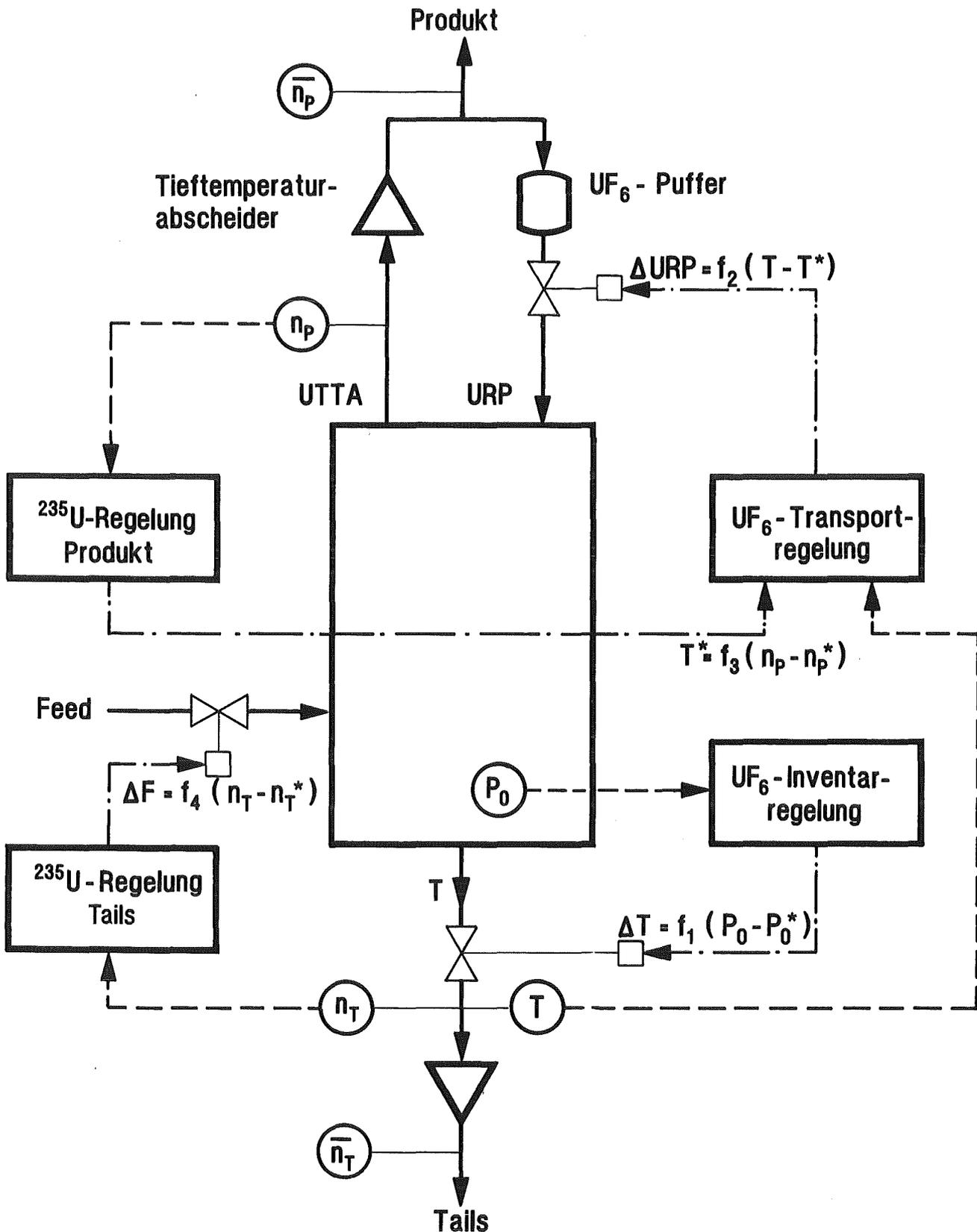


Abb. 19: Prinzipieller Aufbau der Betriebsregelung zur Konstanthaltung der <sup>235</sup>U-Isotopenkonzentration einer produzierenden Kaskade mit negativem Stufengradienten und Tiefemperaturabscheidern zur UF<sub>6</sub>/Zusatzgastrennung am Kaskadenkopf.

erreicht, daß bei einer Sollwertabweichung der  $^{235}\text{U}$ -Isotopenkonzentration  $n_T$  eine Korrektur für den Feed-Strom ermittelt wird.

Die Regelaufgabe wird wesentlich erleichtert, wenn der  $\text{UF}_6$ -Puffer am Kopf der Kaskade entfällt, wie dies beim Ersatz der zyklisch arbeitenden Tieftemperaturabscheider durch eine aus wenigen Trenndüsenstufen bestehende kontinuierlich arbeitende Gastrennkaskade [15] der Fall ist. Bei der Vorlaufkaskade in Resende (vgl. Einleitung) wurde aus wirtschaftlichen Gründen eine Zwischenlösung gewählt, bei der eine Vorabscheidung mit einer Trenndüsenstufe vorgesehen ist, während die Feintrennung mit zyklisch arbeitenden Tieftemperaturabscheidern erfolgt. Durch den aus der Vorabscheidungstrennstufe stammenden kontinuierlichen  $\text{UF}_6$ -Rückstrom werden die Regelprobleme bereits erheblich gemildert.

Der in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Resultaten von Rechenprogrammen bestätigt die Brauchbarkeit der theoretischen Ansätze für die Kaskade und das Regelsystem im Fall der 10-stufigen mit Doppelumlenksystemen ausgerüsteten Pilot-Anlage. Da bei größeren Stufenzahlen, anderen Trennsystemen und anderen Stufenverschaltungen nicht mit grundsätzlich neuen Phänomenen zu rechnen ist [4] dürften sich die Ergebnisse auch auf technische Trenndüsenanlagen übertragen lassen.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] E. W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel:  
"Separation of the Isotopes of Uranium by the Separation Nozzle Process",  
Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 6, 507-518 (1967);  
see also, E. W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte,  
D. Seidel: "Physics and Technology of Separation Nozzle Process",  
Nuclear Energy Maturity, Proc. Europ. Nucl. Conf. , Paris, Invited Sessions,  
Pergamon Press Ltd., Oxford, 172-180 (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, 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. Trenndüsenystem mit zweifacher Strahlumlen-  
kung und trifraktionärer Gasabsaugung", Z. Naturforschung 32a, 401-410  
(1977).
- [3] 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).
- [4] P. Bley, W. Ehrfeld, B. Maciejewski:  
"Minimierung von Trennleistungsverlusten beim Betrieb einer Trenn-  
düsenanlage mit Doppelumlenksystemen zur Anreicherung von Uran-  
235."  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Bericht KfK 3662 (1984).
- [5] E.W. Becker, G. Frey, R. Schütte und D. Seidel:  
"Entmischung der Uranisotope in einer zehnstufigen Trenndüsen-  
Versuchsanlage", Atomwirtschaft, Jahrgang XIII, 7, 359-362 (1968).
- [6] E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel: Urani-  
um enrichment by the separation nozzle process, Naturwissenschaften 63,  
407-411 (1976).
- [7] R. Yadoya, P. Bley, A. S. Camara, R. Consiglio, H. Hein, G. Linder:  
"Usina-Piloto de 10 Estágios: sua Utilização na Pesquisa do Comporta-

mento Dinâmico e Processo de Regulagem de uma Cascata de Jato Centrífugo Para Enriquecimento de Urânio", *Ciência e Cultura*, 38 (10), São Paulo, 1732-1739 (1986).

- [8] P. Bley, W. Ehrfeld, U. Knapp, G. Krieg:  
"Entwicklung von Gasanalysatoren für das Trenndüsenverfahren in Zusammenarbeit mit der Industrie". *KfK Nachrichten* 2, 48-57 (1979).
- [9] K. Cohen:  
"The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U-235", McGraw-Hill, New York (1951).
- [10] W. Ehrfeld, W. Fritz, "Analysis of Cooperative Behavior of Rarefied Flow and Continuum Flow Components in Separation Nozzle Cascades", *Rarefied Gas Dynamics*, 12th Int. Symp., edited by Sam S. Fisher, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 74, Vol., 1, 642-655 (1980).
- [11] W. Fritz, P. Hoch, G. Linder, R. Schäfer, R. Schütte:  
"Experimentelle Untersuchungen und Digitalrechner-Simulation des instationären Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden für die U-235-Anreicherung", *Chem. Ing. Techn.*, 45, 590 - 596 (1973).
- [12] W. Fritz, R. Schäfer, R. Schütte:  
"Auswirkungen und Gegenmaßnahmen beim Ausfall eines Stufenverdichters in einer Trenndüsenkaskade zur U-235-Anreicherung", *KfK-Bericht* 2142 (1975), Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- [13] Wolfgang Latzel:  
Regelung mit dem Prozeßrechner (DDC); Theoretische und experimentelle Methoden der Regelungstechnik, Band 13; Wissenschaftsverlag, Bibliographisches Institut.
- [14] W. Ehrfeld, D. Fröhlich, O. Fromhein, U. Knapp:  
"Verfahren zur automatischen Isotopenverhältnismessung bei magnetischen Massenspektrometern", *KfK-Bericht* 2344 (1977), Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [15] P. Bley, W. Ehrfeld, D. Schmidt:  
"Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur gasdynamischen Trennung von Uranhexafluorid und Helium in Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von Uran-235", *KfK-Bericht* 3991 (1986), Kernforschungszentrum Karlsruhe

## 8. Nomenklatur

|                   |  |
|-------------------|--|
| $E_1, E_2, E_3$   | Exponent zur Berechnung von Betriebsgrößen in Abhängigkeit vom UF <sub>6</sub> -Stufeninventar |
| F                 | Feed-Strom   |
| G                 | linearer Parameter der Stufenkennlinie, Stufengradient   |
| H                 | quadratischer Parameter der Stufenkennlinie  |
| $I_U^{St}$        | UF <sub>6</sub> -Inventar einer Trennstufe   |
| $L_i^k$           | Durchsatz der Komponente i im Trennsystem k  |
| $N_j$             | molare UF <sub>6</sub> -Konzentration der Fraktion j einer Trennstufe                          |
| $n_j$             | <sup>235</sup> U-Molenbruch des UF <sub>6</sub> -Stromes der Fraktion j einer Trennstufe       |
| $n_e$             | <sup>235</sup> U-Molenbruch des externen UF <sub>6</sub> -Stromes                              |
| P                 | Produktstrom   |
| $P_A$             | Verdichteransaugdruck  |
| $P_j$             | Druck in der Fraktion j einer Trennstufe   |
| $P_{RP}$          | UF <sub>6</sub> -Einspeisedruck am Kaskadenkopf  |
| R                 | Rückstauverhältnis $P_5/P_1$ der schweren Fraktion   |
| $R_{RP}$          | Sollwertgeber für den UF <sub>6</sub> -Einspeisedruck $P_{RP}$                                 |
| $R_T$             | Regelsignal für den UF <sub>6</sub> -Transport   |
| T                 | Tails-Strom  |
| TTA               | Tieftemperaturabscheider am Kaskadenkopf   |
| URP               | UF <sub>6</sub> -Kopfufferrückstrom  |
| UTTA              | UF <sub>6</sub> -Einstrom in die Tieftemperaturabscheider am Kaskadenkopf                      |
| VAT               | Vorabscheidertrennstufe  |
| $\delta U$        | Werterzeugung  |
| $\theta_i^k$      | partiellies Abschälverhältnis der Komponente i im Trennsystem k                                |
| $\theta_U^n$      | nominelles UF <sub>6</sub> -Abschälverhältnis  |
| $\tau_i$          | Transport der Komponente i in der Kaskade  |
| $\epsilon_A^{St}$ | elementarer Trenneffekt einer Stufe  |

## Index

A Ansaugseite des Verdichters

An Anreicherungsteil

Ab Abreicherungsteil

e externer  $UF_6$ -Strom

F Feed

P Produkt

RP Kopfpuffer

T Tails

i Komponente

g Gemisch

u Uranhexafluorid

z Zusatzgas

j Fraktion

o Düsengas

l leichte Fraktion

m mittlere Fraktion

s schwere Fraktion

k Trennsystem

1 1. Düse

2 2. Düse

St Stufe

## Sonderzeichen zur Kennzeichnung einer Größe x

$X^*$  Sollwert

$X'$  ungestörter Betriebszustand

$\bar{X}$  zeitlicher Mittelwert

$\Delta X$  Abweichung gegenüber einem ungestörten Betriebszustand.