



KfK 2685
September 1978

Methodik der Störungsdiagnose in Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung

R. Schütte, H. Steinhaus
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 2685

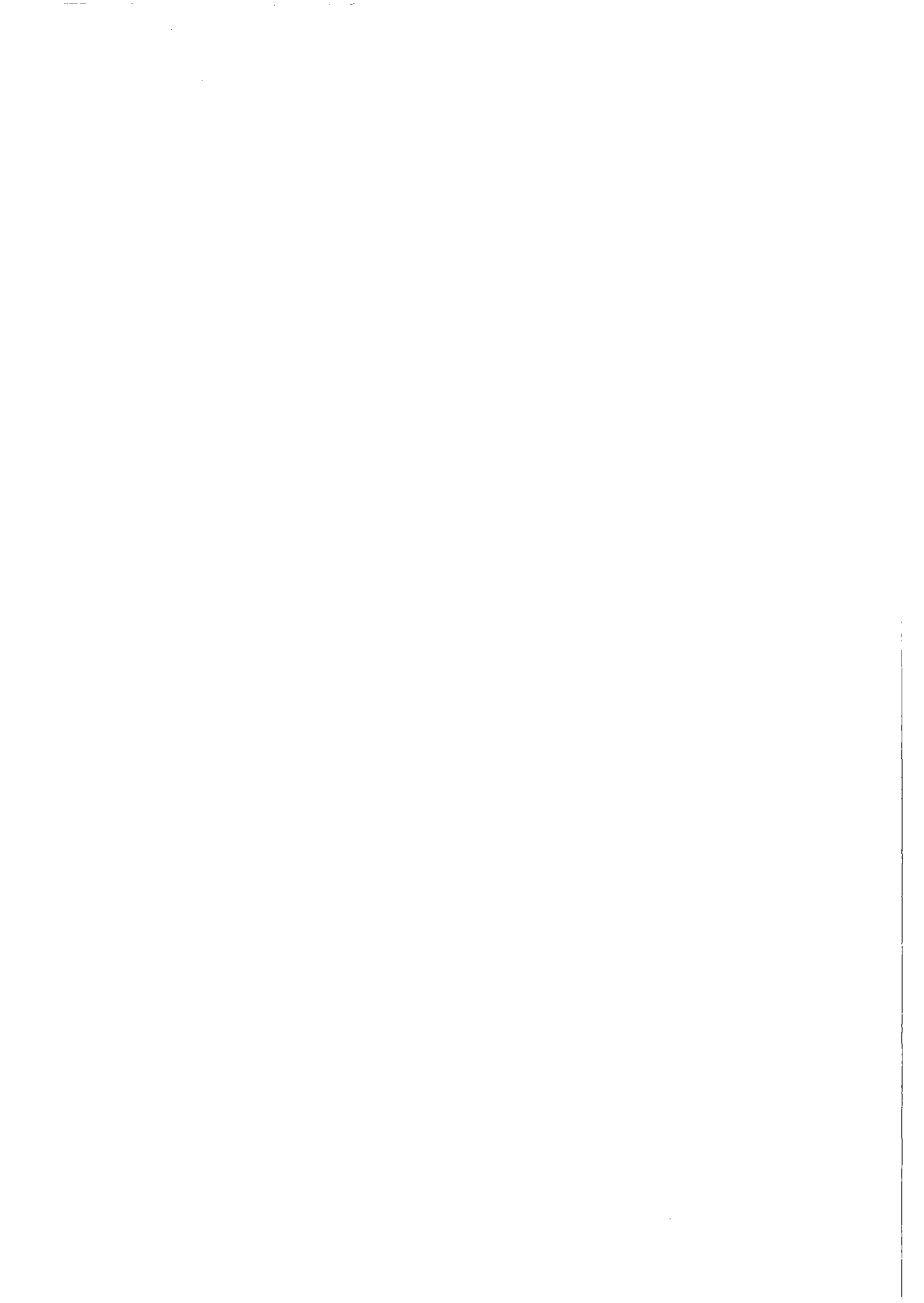
METHODIK DER STÖRUNGSDIAGNOSE IN TRENNDÜSEN-
KASKADEN ZUR U-235-ANREICHERUNG

R. Schütte

H. Steinhaus +)

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

+) Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität
Karlsruhe (T.H.) genehmigte Dissertation



Zusammenfassung:

In einer Trenndüsenkaskade werden zur Anreicherung des leichten Uranisotops Uran-235 ca. 450 Trennstufen hintereinandergeschaltet. Um die optimale Trennleistung einer solchen Anlage zu gewährleisten, müssen die vorgesehenen Sollbetriebsbedingungen: Düsenvordruck P_0 , UF_6 -Konzentration N_0 , die Abschälverhältnisse \mathcal{J}_U des UF_6 und \mathcal{J}_Z des leichten Zusatzgases in allen Trennstufen, sowie die Einspeise-, Produkt- und Abfallströme eingehalten werden.

Da die Abschälverhältnisse nicht unmittelbar gemessen werden können, werden sie aus den Druckmeßwerten P_0 und aus Konzentrationsmessungen N_0 in jeder Stufe und N_1 , N_8 in ausgewählten Stufen unter Zuhilfenahme der Materialströmbilanzen der Kaskade errechnet.

Hierzu ist die Anwendung einer Digitalrechner-Meßwertverarbeitung erforderlich. Damit werden aus etwa 1500 Meßwerten die insgesamt 2500 Betriebsgrößen erfaßt, die zur Beschreibung des Anlagenzustandes erforderlich sind.

Die Anlagenüberwachung mit Hilfe eines Digitalrechners bietet die für die Betriebsführung hilfreiche Möglichkeit einer schnellen Diagnose von im Normalbetrieb auftretenden Störungen. Durch die Diagnose von Störungen noch vor dem Ansprechen der Anlagenschutzeinrichtung werden die Verfügbarkeit und die Wirtschaftlichkeit einer Kaskade wesentlich verbessert.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Erkennung der wichtigsten in einer Trenndüsenkaskade zu erwartenden gasdynamischen Störungen entwickelt. Diese Methodik beruht darauf, daß eine Kennzeichnung der vier Störungsprofile von N_0 , P_0 , \mathcal{J}_U und \mathcal{J}_Z durch die Angabe ihrer Maximalwerte $\Delta \hat{P}_0$, $\Delta \hat{N}_0$, $\Delta \hat{\mathcal{J}}_U$ und $\Delta \hat{\mathcal{J}}_Z$ und der Mittelwerte $\overline{\Delta N_0}$ und $\overline{\Delta P_0}$ genügt, um mit Hilfe einfacher Beziehungen zwischen diesen sechs Werten und aus ihrer relativen Lage die Störungsursache zu identifizieren und den Störungsort zu lokalisieren.

Die Funktionsweise wurde in Versuchen mit der 10stufigen Pilot-Anlage erprobt. Der Anwendungsbereich und die Durchführungsweise für industrielle Trenndüsenkaskaden können vorausgesagt werden, wenn die Kennlinien der dort zum Einsatz gelangenden Komponenten (Trenndüsen, Verdichter, Regelventile) bekannt sind. Die methodischen Ansätze der Störfalldiagnose liefern zugleich die Grundlage für eine rechnergeführte Einzelregelungsprozedur, mit der eine Trenndüsenkaskade aus einem beliebigen, stationären Betriebszustand in den Soll-Betriebszustand gesteuert werden kann.

Method of Fault Diagnosis in Separation Nozzle Cascades for U-235 Enrichment

Abstract

In a separation nozzle cascade for enrichment of the light uranium isotope U-235 some 450 stages are connected in series. For optimum separation performance of such a plant the design values of the nozzle inlet pressure P_0 , of the UF_6 concentration N_0 , of the UF_6 -cut \mathcal{V}_U and the cut of the light additional gas \mathcal{V}_Z must be matched in all separation stages. Also the feed stream, the product stream, and the tails stream have to be controlled according to the cascade design values.

Since it is not possible to measure the cuts directly, these values are calculated on the basis of the material flow balances of the cascade using the pressure values P_0 and the UF_6 concentration measurements N_0 in each stage, these data being supplemented by concentration measurements N_1 and N_s in the light and heavy fractions of selected stages. This approach requires the use of a digital computer for processing some 1500 readings to calculate the 2500 plant parameters defining the plant state.

Plant supervision by electronic data processing offers the additional possibility for quick computer diagnosis of gas-dynamic faults in plant operation. By such fault diagnosis, performed before initiation of the plant protection systems, the availability and economy of a cascade can be greatly improved.

This study describes a method of diagnosing the major faults to be expected in a separation nozzle cascade. It is based on the fact that the fault profiles of ΔN_0 , ΔP_0 , $\Delta \mathcal{V}_U$ and $\Delta \mathcal{V}_Z$ (set point deviations Δ) are characterized sufficiently well by the maximum values of $\overline{\Delta N_0}$, $\overline{\Delta P_0}$, $\overline{\Delta \mathcal{V}_U}$ and $\overline{\Delta \mathcal{V}_Z}$ and the mean values of $\overline{\Delta N_0}$ and $\overline{\Delta P_0}$ to identify the cause of a fault and localize the point where it occurs by means of simple relations between these six values and of their relative positions.

The performance of the method has been tested in experiments in the ten-stage pilot plant. For use in commercial separation nozzle cascades the range of performance and the special mode of implementation can be derived from the characteristics of the plant components (separation nozzles, compressors, control valves). The methodological approach in this fault diagnosis also provides the basis for computer aided control procedures to raise a separation cascade from any steady plant condition to its set point operation.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Zusammenfassung	1
2. Die methodischen Ansätze zur Erkennung gasdynamischer Störungen in Trenndüsen-Kaskaden	6
2.1 Die gasdynamischen Betriebsgrößen einer Trenndüsenkaskade	6
2.2 Kollektive und lokale Störungen	9
2.3 Kollektive Störungen	11
2.3.1 Die Erkennung kollektiver Störungen	11
2.3.2 Unterscheidung zwischen Uran- und Zusatzgastransportstörungen	13
2.3.3 Störungen des Urantransportes τ_U	15
2.3.4 Störungen des Zusatzgastransportes τ_Z	16
2.3.5 Ursachen für kollektive Störungen	18
2.4 Lokale Störungen	21
2.4.1 Rückstaustörungen in einer Trennstufe	24
2.4.2 Störung des Kompressionsverhältnisses eines Verdichters	25
2.4.3 Unterscheidung von Rückstau- und Verdichterstörung	27
2.4.4 Fehlerhafte UF_6 -Rückspeisestromstärken U_R der UF_6 -Abscheidungsanlagen	27
2.4.5 Die Erkennung von Meßgerätefehlern	
3. Die Methodik der Störungsdiagnose	29
3.1 Kaskadenüberwachung mit gestaffelter Störungsdiagnose	29
3.1.1 Meßwerterfassung und Datennormierung	29
3.1.2 Beurteilung des Einregelungszustandes	31
3.1.3 Erkennung von akuten Störfällen (Kurzzeit-Diagnose)	32
3.1.4 Erkennung von driftenden Störungen (Langzeit-Diagnose)	32

	<u>Seite</u>
3.2 Die Durchführung der Störungsdiagnose	33
3.2.1 Unterscheidung zwischen kollektiven und lokalen Störungen	35
3.2.2 Erkennung der Ursachen bei kollekti- ven Störungen	36
3.2.3 Diagnose lokaler Störungen	36
3.3 Die Anwendung der methodischen Ansätze zum Erkennen gasdynamischer Störungen bei der Einregelung von Trenndüsenkaskaden	37
4. Diskussion der Ergebnisse	43
Literaturverzeichnis	46
Nomenklatur	48

1. Einleitung und Zusammenfassung

Beim Trenndüsenverfahren zur Anreicherung des leichten Uranisotops U-235 erfolgt die Isotopenentmischung unter dem Einfluß der massenabhängigen Zentrifugalkräfte in einer gekrümmten Gasströmung, die entsprechend Abb. 1 entlang einer zylindrischen Umlenk wand verläuft /1/. Als Verfahrensgas wird ein Gemisch aus Uranhexafluorid (UF_6) und einem leichten Zusatz (H_2 bzw. He) verwendet. Das in großem molaren Überschuß eingesetzte leichte Zusatzgas erhöht die für die Zentrifugalkräfte maßgebliche Strömungsgeschwindigkeit des Gases. Eine weitere positive Wirkung ergibt sich während der Einstellung des Isotopengleichgewichtes aufgrund der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Isotope im Zusatzgas /2/.

Wie bei den anderen Verfahren zur U-235-Anreicherung muß der Anreicherungs effekt durch Hintereinanderschaltung einer größeren Anzahl von Trennelementen in einer Trennkaskade vervielfacht werden /3/. Um die für die Verwendung als Kernbrennstoff erforderliche Anreicherung des Uran-235 auf etwa 3 % und eine hinreichende Verarmung des U-235 im Abfallmaterial zu erzielen, sind beim derzeitigen Entwicklungsstand des Trenndüsenverfahrens entsprechend dem Blockschaltbild in Abb. 2 etwa 500 Trennstufen erforderlich /4/, /5/. Die Verwendung von zwei Stufentypen vermindert die Isotopenvermischungsverluste innerhalb der Kaskade und verkürzt die Einstellzeit. In den Trenndüsen tritt neben der gewünschten Entmischung der Uranisotope eine sehr viel stärkere Trennung zwischen Uranhexafluorid und dem leichten Zusatzgas auf. Um eine Anreicherung des Zusatzgases in den Kopfstufen der Kaskade zu verhindern, muß der Aufwärtstransport des leichten Zusatzgases aus den Kopfstufen der Rechteck-Kaskadenabschnitte entnommen und zum Kaskadenfuß zurückgespeist werden.

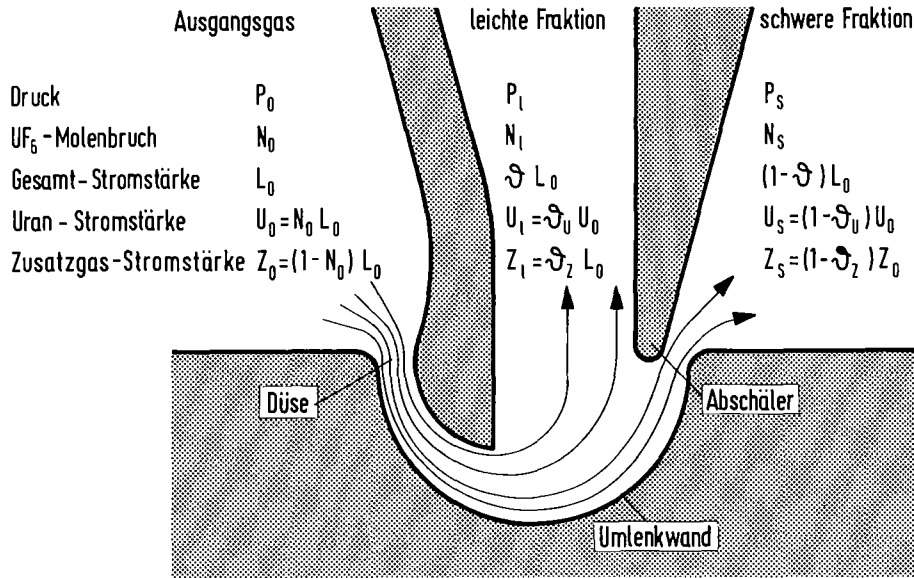


Abb. 1: Querschnitt durch eine schlitzförmige Trenndüse mit schematisch eingezeichneten Stromlinien und den verwendeten Bezeichnungen für die Betriebsbedingungen.

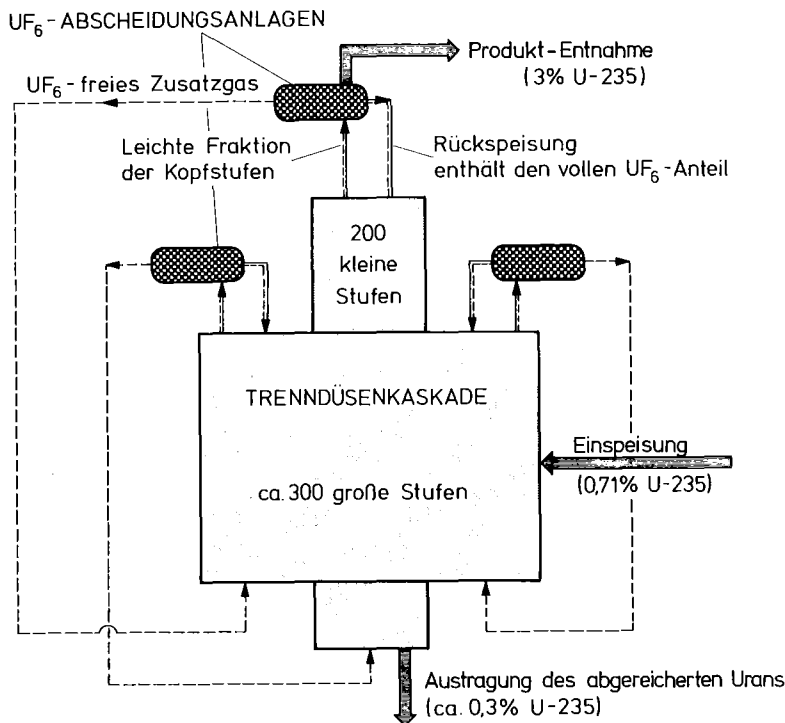


Abb. 2: Blockschaltbild einer industriellen Trenndüsenkaskade. Breite und Höhe der Rechtecke sind Maße für den Durchsatz bzw. die Anzahl der hintereinandergeschalteten Trennstufen. Eine Anreicherung von Zusatzgas am Kaskadenkopf wird durch Entnahme des Zusatzgastransportes mit Hilfe der UF₆-Abscheidungsanlagen und durch Rückführung zu den entsprechenden Fußstufen verhindert.

Diese Aufgabe übernehmen die in Abb. 2 eingezeichneten UF_6 -Abscheidungsanlagen, in denen der UF_6 -Gehalt den Verfahrensströmen der Kopfstufen vollständig entnommen und über einen Puffer zurückgespeist wird /6/, /7/.

Für die Betriebsführung industrieller Anreicherungsanlagen ist es wichtig, daß die vorgesehenen Sollbetriebsbedingungen der Trenndüsen in allen Stufen der Kaskade gleichermassen eingehalten werden, um die gewünschte Trennleistung der Anlage zu gewährleisten. Zugleich müssen die Materialströme der Kaskade, bzw. eines Kaskadenabschnittes nach Abb. 2 auf die Sollwerte eingestellt sein. Wegen der großen Anzahl von Meßwerten und wegen der Tatsache, daß einige wichtige Verfahrenswerte wie z. B. die Abschälverhältnisse der Trenndüsen nicht unmittelbar gemessen werden können, sondern berechnet werden müssen, wird in Trennkaskaden mit großen Stufenzahlen zweckmäßigerweise eine ON-LINE-Meßwertverarbeitung mit Digitalrechner eingesetzt /9/. Mit ihrer Hilfe lassen sich im vorliegenden Fall aus etwa 1500 Meßwerten die insgesamt 2500 Betriebsgrößen berechnen, die zur vollständigen Beschreibung des gasdynamischen Anlagenzustandes erforderlich sind.

Die Überwachung und Aufrechterhaltung des gasdynamischen Sollzustandes der Anlage ist für den praktischen Betrieb von erheblicher Bedeutung, da schon geringe Abweichungen zu merklichen Trennarbeitsverlusten mit entsprechenden wirtschaftlichen Nachteilen führen können. Die erwähnten 2500 Betriebsgrößen müssen daher fortgesetzt mit den Sollwerten verglichen und die Diskrepanzen zur schnellen Ermittlung der Fehlerursachen herangezogen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Störungsdiagnose in Trenndüsenkaskaden entwickelt. Mit dieser Methodik erkennt ein Rechnerprogramm der Datenverarbeitung in einer vorhandenen Datenerfassungsanlage die wichtigsten im technischen Betrieb zu erwartenden gasdynamischen Störungen.

Betrachtet man die durch eine Störung verursachten Sollwertabweichungen der folgenden vier Verfahrensbedingungen (s. Abb. 1):

Düsenvordruck	P_0^+
UF ₆ -Molenbruch	N_0^+
Uran-Abschälverhältnis	\mathcal{J}_U^+
Zusatzgas-Abschälverhältnis	\mathcal{J}_Z^+

so zeigt sich, daß unterschiedliche Störungsursachen an der unterschiedlichen Form und der gegenseitigen Zuordnung ihrer "Störungsprofile" zu erkennen sind. Für die Gruppe der lokalen Störungen ergibt die Auftragung der Sollwertabweichungen über der Stufenzahl einen Satz von Störungsprofilen, die sämtlich ein Maximum in der Nähe der Fehlerquelle besitzen und in ihrer Nachbarschaft rasch abklingen. Sie können durch Komponentenveränderungen oder Steuerungsfehler einzelner Stufen hervorgerufen sein, aber auch durch fehlerhafte äußere Materialströme verursacht werden. Demgegenüber ist die Gruppe der kollektiven Störungen dadurch gekennzeichnet, daß die Betriebsbedingungen sämtlicher Stufen eines Kaskadenabschnittes in gleicher Weise betroffen werden.

In dieser Arbeit wird gezeigt, daß eine Kennzeichnung der vier Störungsprofile durch die Angabe ihrer Maximalwerte $\Delta \hat{P}_0$, $\Delta \hat{N}_0$, $\Delta \hat{\mathcal{J}}_U$, $\Delta \hat{\mathcal{J}}_Z$ und der Mittelwerte $\overline{\Delta P}_0$, $\overline{\Delta N}_0$ genügt, um mit Hilfe einfacher Beziehungen

zwischen diesen sechs Werten und aus ihrer relativen Lage die Störungsursache zu identifizieren und den Störungsort zu lokalisieren.

Das Diagnoseverfahren wurde in Versuchen mit einer Trenndüsen-Versuchskaskade, der 10-stufigen Pilot-Anlage^{*)} im Institut für Kernverfahrenstechnik der Universität Karlsruhe und des Kernforschungszentrums erprobt. Sein Anwendungsbereich und die spezielle Durchführungsweise für industrielle Trenndüsenkaskaden lassen sich voraussagen, wenn die Kennlinien der dort zum Einsatz gelangenden Komponenten (Trenndüsen, Verdichter, Rückstauventile) bekannt sind.

Die Methodik der Störungsdiagnose liefert auch die Grundlage für eine rechnergeführte Einregelungsprozedur, mit der eine Trenndüsenkaskade aus einem beliebigen, stationären Betriebszustand in den Sollbetriebszustand gesteuert werden kann. Dies wird in einem Beispiel einer rechnergeführten Einregelung der Pilot-Anlage am Ende dieser Arbeit gezeigt.

^{*)} Bezüglich des Aufbaus, der Betriebsweise und des Überwachungssystems der Pilot-Anlage vgl. z. B. /8/, /9/.

2. Die methodischen Ansätze zur Erkennung gasdynamischer Störungen in Trenndüsen-Kaskaden

In der vorliegenden Arbeit werden Störungen betrachtet, die die Gasdynamik des Trennverfahrens beeinflussen und durch Änderungen von Komponenten-Eigenschaften oder durch Bedienungseingriffe verursacht werden. Ihre Auswirkungen führen im allgemeinen nur mittelbar zu Betriebsunterbrechungen oder Ausfällen, sie bewirken aber stets Verluste an Trennleistungen in der Kaskade. Aus beiden Gründen ist eine schnelle Diagnose des Störungsbildes für den technischen Anlagenbetrieb wichtig, da durch frühzeitiges Erkennen von Fehlerursachen und durch ihre Beseitigung Wertverluste verringert werden und Überlastungen von Anlagenteilen noch vor Ansprechen des Anlagenschutzes *) verhindert werden können.

2.1 Die gasdynamischen Betriebsgrößen einer Trenndüsenkaskade

Beim Betreiben industrieller Anreicherungsanlagen ist es wichtig, daß die vorgesehenen Sollbetriebsbedingungen der Trenndüsen eingehalten werden. Diese Sollbetriebsbedingungen sind (vgl. Abb. 1):

Düsenvordruck	P_0^+
UF ₆ -Molenbruch	N_0^+
Uranabschälverhältnis	η_U^+
Zusatzgasabschälverhältnis	η_Z^+

*) Die maschinentechnische Überwachung (Maschinenschutz, Störungsmeldung etc.) und die Folgen von Komponentenausfällen werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Die gasdynamischen Auswirkungen beispielsweise eines Verdichter-Ausfalls und des Herausschaltens einer Gruppe von Stufen aus der laufenden Kaskade wurden mit Hilfe von Simulationsrechnungen in /10/ dargestellt.

Zugleich müssen die Materialtransporte der Kaskade bzw. eines Kaskadenabschnittes nach Abb. 3 auf die Sollwerte eingestellt sein:

Produkt-Strom	$\tau_{U,P}^+$	Urantransport im Anreicherungsabschnitt
Abfall-Strom	$\tau_{U,W}^+$	Urantransport im Abreicherungsabschnitt
Zusatzgastransport	$\tau_Z^+ = Z_R^+$	

Zusätzlich zu diesen Betriebsgrößen müssen die Uranrückspeisestromstärken U_R^+ aus den UF_6 -Puffern der Abscheidungsanlagen eingehalten werden, um Störungen zu vermeiden.

Die Hintereinanderschaltung der Trennstufen in einer Kaskade bedingt zur Befolgung der Nichtvermischungsbedingung für die Isotope bestimmte Werte des nominellen Uranabschälverhältnisses $\mathcal{J}_U^* = 1/2, 1/3, 1/4$ etc.. In Abb. 3 ist die Anordnung der Trennstufen (Trenndüsen mit Stufenverdichter) für eine Kaskade mit $\mathcal{J}_U^* = 1/2$ gezeigt. Dies ist die einfachste Art der Zusammenschaltung. Bei Betrieb ohne Entnahme muß in allen Stufen der Wert des effektiven Uranabschälverhältnisses $\mathcal{J}_U = \mathcal{J}_U^* = 1/2$ sein. Bei der Planung technischer Kaskaden wird zur Zeit ein nominelles Uranabschälverhältnis $\mathcal{J}_U^* = 1/4$ zugrundegelegt. Für den Einsatz in einer Kaskade werden die Trenndüsen mit einer Abschälerstellung gefertigt, die bei gleichgroßen Absaugdrücken $P_1 = P_s$ ein etwas zu kleines Abschälverhältnis \mathcal{J}_U liefert. Mit Hilfe der in Abb. 3 eingezeichneten Rückstauventile können die Abschälverhältnisse durch Drosselung in der schweren Fraktion auf den gewünschten Wert $\mathcal{J}_U^+ = \mathcal{J}_U^* (1 + \tau_U^+/U_O^+)$ angehoben werden, der erforderlich ist, um einen gewünschten Urantransport $\tau_U^+ = U_O^+ (\mathcal{J}_U^+ / \mathcal{J}_U^* - 1)$ in der Kaskade zu erzeugen.

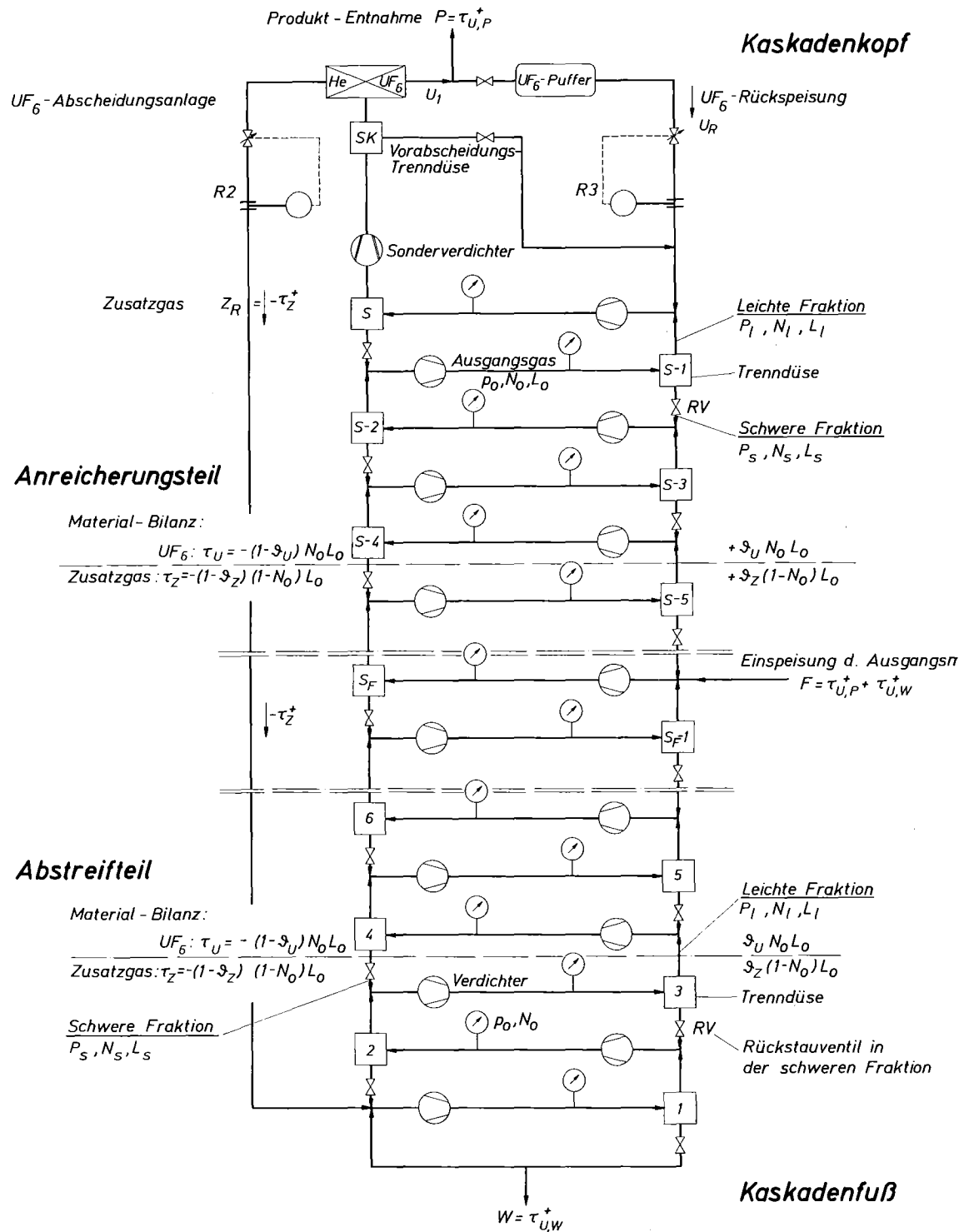


Abb. 3: Fließbild einer aus identischen Stufen bestehenden Trenndüsenkaskade für ein nominelles Uranabschälverhältnis $\beta_U^* = 1/2$. Rechteckkaskade mit Vorabscheidungs-trenndüse und UF₆-Abscheidungsanlage am Kaskadenkopf und Rückführung des Zusatzgastransportes τ_Z an den Kaskadenfuß.

Da die Abschälverhältnisse nicht unmittelbar gemessen werden können, werden sie aus den Druckmeßwerten P_0 und P_1 und aus den Konzentrationsmessungen N_0 in jeder Stufe unter Zuhilfenahme der Materialstrombilanzen der Kaskade errechnet, wozu in einer kleinen Zahl ausgewählter Stufen die Messung der UF_6 -Konzentrationen N_1 in der leichten und N_s in der schweren Fraktion erforderlich ist /8/.

2.2 Kollektive und lokale Störungen

Die Zusammenschaltung von Trennstufen zu Kaskaden bewirkt, daß durch Störungen die Betriebsbedingungen einer gewissen Anzahl benachbarter Stufen oder aber sämtliche Stufen eines Kaskadenabschnittes beeinflußt werden. Im ersten Fall sprechen wir von lokalen Störungen ^{*)}, die durch Fehler oder Abweichungen in einer einzelnen Trennstufe verursacht werden und deren Auswirkungen auf die Betriebsbedingungen in den Nachbarstufen der Störstelle im allgemeinen rasch abklingen. Das zweite Störungsbild wird als kollektive Störung bezeichnet. Hier liegen die Störungsursachen entweder in fehlerhaft aufgeprägten äußeren Kaskadenströmen oder in einheitlich fehlerhaft eingeregelter Trennstufen.

Für die Durchführung der Störungsdiagnose ist die methodische Unterscheidung dieser beiden Störungsgruppen wesentlich. Dabei werden in beiden Fällen die stationären Endzustände betrachtet, in die die Betriebsbedingungen in den Stufen nach dem Auftreten einer bleibenden Störungsursache übergehen. Diese Übergänge wurden bei den Untersuchungen des Betriebsverhaltens von Trenndüsen-Kaskaden in Experimenten mit der 10-stufigen Pilot-Anlage gemessen

^{*)} Der Begriff "Störung" wird im folgenden häufig als Oberbegriff für Störungsursache und Störungsauswirkung benutzt.

/11/ und in Digitalrechner-Simulationen für industrielle Kaskaden dargestellt /10/, /12/. Bei zeitlich sprunghaftem Störungsverlauf weisen die Übergangsfunktionen der Betriebswerte in der Nähe der Störstelle Zeitkonstanten im Bereich von 0,1 bis 1 min auf, so daß das gestörte Profil der Betriebsbedingungen in der Nachbarschaft der Störstelle nach etwa 0,5 bis 3 min seinen stationären Zustand erreicht /12/ (Vgl. z. B. Abb. 7 auf S. 23).

Ändern sich die Betriebsbedingungen in einem Kaskadenbereich, so ändern sich die Stufeninventare I_U und I_Z . Verschiebungen des Zusatzgasinventars I_Z erfolgen mit einer Wanderungsgeschwindigkeit, die größenordnungsmäßig dem Kehrwert der Verweilzeit $\theta = (I_U + I_Z)/L_0$ des Verfahrensgases in einer Stufe entspricht /11/. Diese Verweilzeit liegt im Bereich von 1 bis 2 Sekunden pro Stufe. Die Störungen, die durch Zusatzgasverschiebungen in sonst ungestörte Kaskadenbereiche hineingetragen werden, sind auf relativ kleine Sollwertabweichungen in den Drucken und Konzentrationen beschränkt, da selbst größere Zusatzgas-transportänderungen nur geringe Abweichungen der Betriebsbedingungen verursachen. Über die mit diesen vorübergehenden Sollwertabweichungen verbundenen kleinen Änderungen der Stufentrennleistungen hinaus werden keine zusätzlichen Wertverluste verursacht.

Bei Verschiebungen von Uraninventar ist dagegen die mit einem gestörten Materialtransport verbundene Isotopenvermischung stets eine zusätzliche Ursache von Wertverlusten, die den lokalen Störeffekt überwiegen kann. Andererseits sind aber die Wanderungsgeschwindigkeiten des Uraninventars I_U in der Trenndüsenkaskade etwa eine Größenordnung niedriger als die des Zusatzgasinventars und betragen etwa 0,1 Stufen/sec /11/, /12/. Daher ist es ausreichend, wenn in Kaskadenabschnitten mit ca. 150 Stufen die Störungsdiagnose einmal pro Minute durchgeführt wird, sodaß im Stör-

fall durch geeignete Gegenmaßnahmen ein Auswandern größerer Inventarmengen aus dem betroffenen Kaskadenbereich verhindert werden kann.

2.3 Kollektive Störungen

Kollektive Störungen sind dadurch gekennzeichnet, daß sämtliche Stufen des gestörten Kaskadenabschnittes praktisch gleichgroße Sollwertabweichungen ihrer stationären Betriebsbedingungen erfahren (vgl. z. B. /8/, /13/). Sie entstehen dadurch, daß einem Kaskadenabschnitt ein von den Sollwerten τ_U^+ , τ_Z^+ abweichender Transport aufgeprägt wird - sei es ein Urantransport $\tau_U \neq \tau_U^+$ oder ein Zusatzgastransport $\tau_Z \neq \tau_Z^+$. Der gleiche Effekt ergibt sich, wenn alle Abschälverhältnisse \mathcal{J}_U , \mathcal{J}_Z in den Stufen durch Rückstauventile gleichmäßig fehleingestellt sind.

2.3.1 Die Erkennung kollektiver Störungen

Für die Zwecke der Störungsdiagnose lassen sich diese kollektiven Störungen daran erkennen, daß die Verhältnisse $\frac{\Delta \hat{N}_O}{\overline{\Delta N}_O}$ und $\frac{\Delta \hat{P}_O}{\overline{\Delta P}_O}$ aus den maximalen Sollwertabweichungen $\Delta \hat{N}_O$, $\Delta \hat{P}_O$ *) und den mittleren Sollwertabweichungen $\overline{\Delta N}$, $\overline{\Delta P}_O$ in dem betrachteten Kaskadenabschnitt nahe bei 1 liegen. Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, ist dies für lokale Störungen grundsätzlich nicht der Fall. In Abb. 4 sind hierzu Meßergebnisse aufgetragen, die mit der 10-stufigen Pilot-

*) Bei den in dieser Arbeit verwendeten Sollwertabweichungen handelt es sich ausschließlich um relative Größen, so ist z. B. $\Delta N_O = (N_O - N_O^+) / N_O^+$.

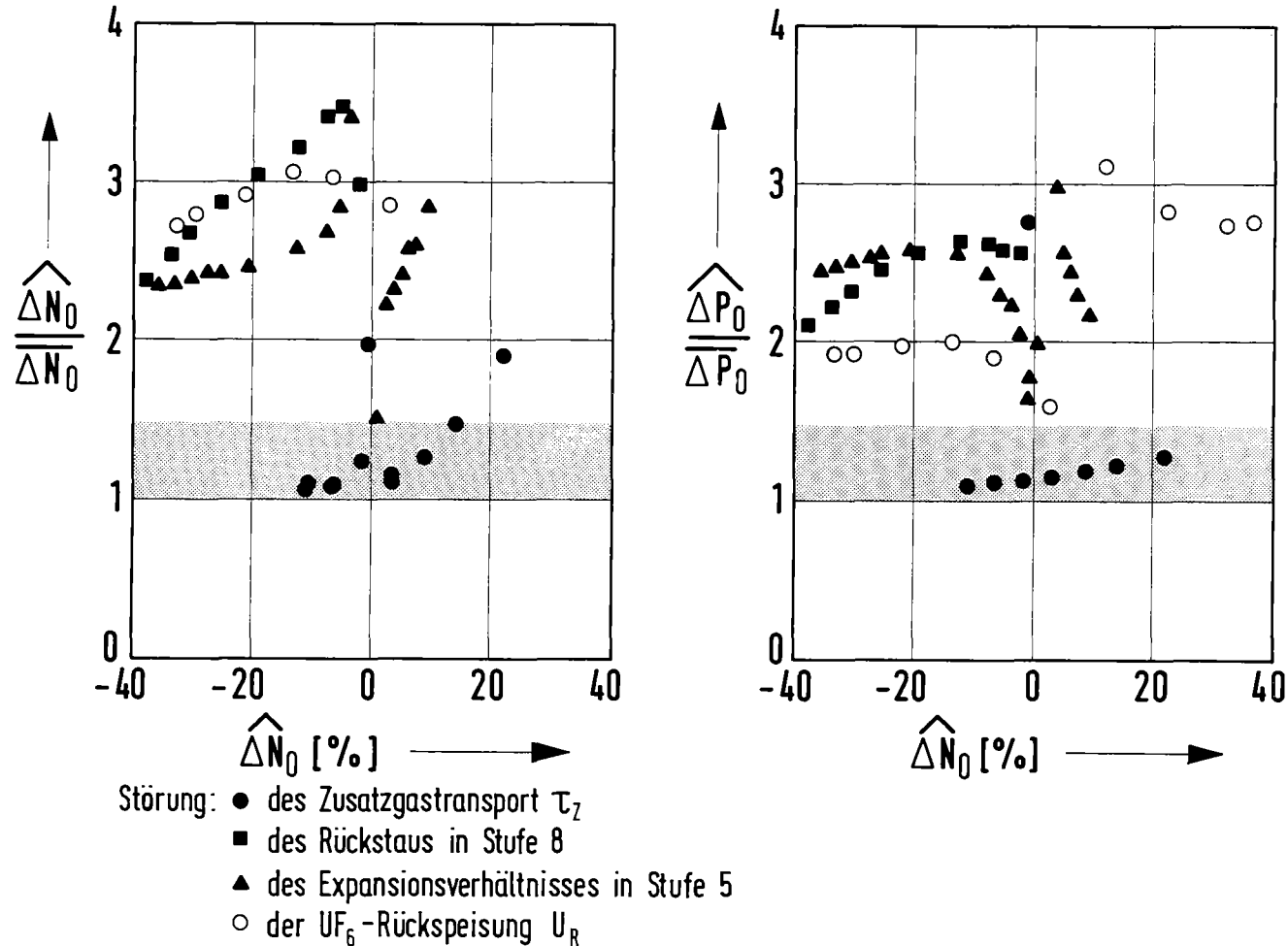


Abb. 4: Vergleich der bei verschiedenen Störungseingriffen in der Pilot-Anlage gemessenen Relationen $\frac{\Delta \hat{N}_0}{\Delta N_0}$ und $\frac{\Delta \hat{P}_0}{\Delta P_0}$. Als Maß für die Größe des Störeingriffs ist als Abszisse die maximale Konzentrationsabweichung $\hat{\Delta N}_0$ benutzt. Man erkennt, daß für die Zusatzgastransportstörung fast alle Werte innerhalb des Rasterbandes liegen. Die anderen Störungen, die Rückstaustörung, die Expansionsverhältnisstörung und die Uranrückspeisestromstärkestörung führen zu Werten, die das Rasterband nicht berühren. Damit sind zwei einfache, redundante Identifikationsmöglichkeiten für kollektive Störungen gegeben.

Anlage erhalten wurden. Man erkennt für die als Beispiel betrachteten Störungen des aufgeprägten Zusatzgastransports $Z_R \neq \tau_Z^+$, daß fast alle Werte der charakteristischen Verhältnisse $\hat{\Delta N}_O / \overline{\Delta N}_O$, $\hat{\Delta P}_O / \overline{\Delta P}_O$ in einem Wertebereich zwischen 1,0 und 1,5 liegen, der von den übrigen Störeinflüssen nicht berührt wird.

2.3.2 Unterscheidung zwischen Uran- und Zusatzgastransportstörungen

Die Möglichkeiten zu einer eindeutigen Unterscheidung zwischen den verschiedenen Ursachen kollektiver Störungen ergeben sich aus einer Betrachtung des Transportediagramms einer Trenndüsenkaskade, das die Zusammenhänge zwischen den Betriebsbedingungen P_O , N_O und den in einer Kaskade herrschenden Transporten des Zusatzgas-Transportes τ_Z und des Urantransportes τ_U beschreibt /14/. Dieses Diagramm benutzt als Grundlage die für den Fall der kollektiven Störung zutreffenden Abhängigkeiten $\tau_U(N_O, P_O)$ und $\tau_Z(N_O, P_O)$ von den Komponenten-Kennlinien (Trenndüse, Verdichter, Rückstauventile) einer Kaskade, deren sämtliche Stufen unter den gleichen stationären Betriebsbedingungen N_O , P_O arbeiten. Als Beispiel sind in Abb. 5a die Kurven für konstante Transportwerte τ_U , τ_Z der Pilot-Anlage gezeigt, deren allgemeines Betriebsverhalten dadurch gekennzeichnet ist, daß Überschüsse oder Fehlbeträge sowohl im Uraninventar I_U als auch im Zusatzgasinventar I_Z der Stufen durch die induzierten Transportänderungen zum Kaskadenkopf wandern und in den dort vorhandenen Materialpuffern rückwirkungsfrei absorbiert werden.

Dieses Verhalten wird quantifiziert durch die Angabe der sogenannten Stabilitätsparameter σ_U und σ_Z ,

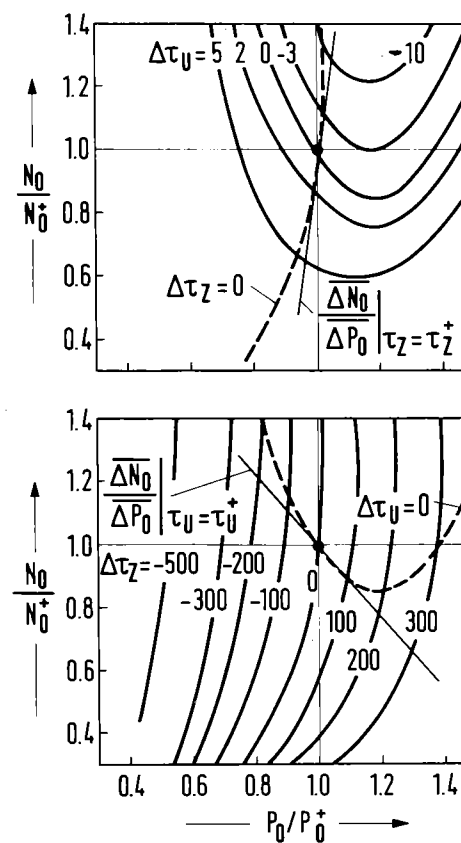
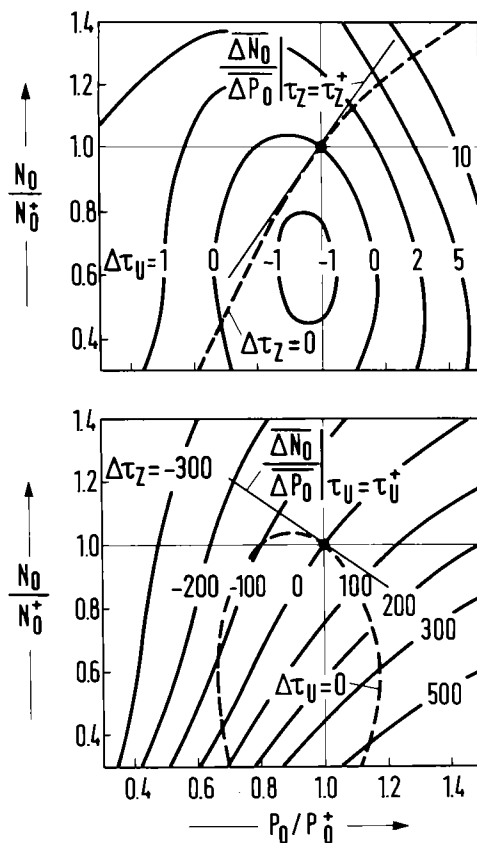


Abb. 5a: Transportediagramm der Pilotanlage mit Roots-Verdichtern, die mit UF_6 -He, $N_0^+ = 5 \%$, $P_0^+ = 53 \text{ mbar}$, $P_0^+/P_1^+ = 3.6$ betrieben wurde /14/.

Abb. 5b: Transportediagramm einer Trenndüsenkaskade mit Trennelementen nach Abb.1 und einstufigen Strömungsverdichtern für UF_6 -H₂, $N_0^+ = 4.2$, $P_0^+ = 240 \text{ mbar}$, $P_0^+/P_1^+ = 2.1$.

Abb. 5: Die Abhängigkeit des Urantransportes τ_U und des Zusatzgastransportes τ_Z in einer Rechteckkaskade von P_0 und N_0 bei gleichen Betriebsbedingungen in den Trennstufen. Die Stromstärken der Transporte sind in willkürlichen, aber vergleichbaren Einheiten (mol/Zeit) angegeben. Die Steigung der eingezeichneten Tangenten im Arbeitspunkt entspricht den Quotienten $\Delta N_0/\Delta P_0$ nach Gleichung (5) und (7).

für das Uraninventar
$$\sigma_U = \theta^+ \left. \frac{d\tau_U}{dI_U} \right|_{\tau_Z^+} \quad (1)$$

für das Zusatzgasinventar
$$\sigma_Z = \theta^+ \left. \frac{\partial\tau_Z}{\partial I_Z} \right|_{I_U^+} \quad (2)$$

die angeben, um welchen Bruchteil eine vorhandene Inventarstörung während einer mittleren Verweilzeit θ abgebaut wird*)/14/. Wegen der starken Gemischtrennung zwischen UF_6 und Zusatzgas werden Trenndüsenkaskaden stets positive σ_Z -Werte aufweisen. Für das Uraninventar muß dies nicht notwendigerweise der Fall sein, Störungen des UF_6 -Inventars werden dann in der Tailsabscheidung am Kaskadenfuß abgepuffert. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 5b gegeben.

2.3.3 Störungen des Urantransportes τ_U

Tritt bei festgehaltenem Zusatzgastransport $\tau_Z = \tau_Z^+ = Z_R^+$ eine Störung $\Delta\tau_U$ des Urantransportes in der Kaskade auf, so verschieben sich in Abb. 5 die Arbeitspunkte der Trennstufen ausgehend vom Punkt P_O^+, N_O^+ auf der Kurve $\tau_Z = \tau_Z^+$ bis zum Schnittpunkt mit der Kurve $\tau_U = \tau_U^+ + \Delta\tau_U$. Für die Änderungen dN_O, dP_O auf diesem Weg gilt exakt

$$d\tau_Z = \frac{\partial\tau_Z}{\partial N_O} dN_O + \frac{\partial\tau_Z}{\partial P_O} dP_O = 0 \quad (3)$$

Betrachtet man in einer für die Störungsdiagnose hinreichenden Näherung das Verhältnis der relativen Differenzen $\Delta N_O / \Delta P_O$ auf der eingezeichneten Tangente im Arbeitspunkt, so gilt

*) Ein positives Vorzeichen von σ bedeutet, daß Inventarstörungen zum Kaskadenkopf wandern. Bei negativen Werten von σ werden Inventarstörungen zum Kaskadenfuß transportiert. In beiden Fällen werden Inventarüberschüsse oder Inventardefizite von den dort vorhandenen UF_6 -Abscheidungsanlagen abgepuffert.

$$\left. \frac{\Delta N_o}{\Delta P_o} \right|_{\tau_Z^+} = \frac{P_o}{N_o} \left. \frac{dN_o}{dP_o} \right|_{\tau_Z^+} = - \frac{P_o}{N_o} \cdot \left. \frac{\partial \tau_Z / \partial P_o}{\partial \tau_Z / \partial N_o} \right|_{N_o^+, P_o^+} \quad (4)$$

Damit ergibt sich mit $Z_o = (1-N_o)L_o$ und mit $\tau_Z = Z_o \cdot (\mathcal{J}_Z / \mathcal{J}_U^* - 1)$ für die kollektive Urantransportstörung ein

Wert des Verhältnisses $\overline{\Delta N_o} / \overline{\Delta P_o}$ der mittleren relativen Sollwertabweichungen im gestörten Kaskadenbereich

$$\left. \frac{\overline{\Delta N_o}}{\overline{\Delta P_o}} \right|_{\tau_Z^+} = - \frac{P_o^+}{N_o^+} \cdot \frac{(\mathcal{J}_Z^+ - \mathcal{J}_U^*) \frac{\partial Z_o}{\partial P_o} + Z_o \frac{\partial \mathcal{J}_Z}{\partial P_o}}{(\mathcal{J}_Z^+ - \mathcal{J}_U^*) \frac{\partial Z_o}{\partial N_o} + Z_o \frac{\partial \mathcal{J}_Z}{\partial N_o}} \Bigg|_{P_o^+, N_o^+} \quad (5)$$

der mit Hilfe der entsprechenden Komponenten-Kennlinien berechnet werden kann.

Die Steigung der Tangente an die Kurve $\tau_Z = \tau_Z^+$ im Punkt N_o^+, P_o^+ in den Transportediagrammen der Abb. 5a und 5b entspricht der Lösung der Gleichung (5) und ergibt für die Pilot-Anlage $\overline{\Delta N_o} / \overline{\Delta P_o} \approx 1.35$, die Pilot-Anlage wird mit einem UF_6 -He-Gemisch mit $N_o^+ = 5 \%$, $P_o^+ = 53$ mbar, $\mathcal{J}_U^* = 1/2$ und $P_o^+ / P_1^+ = 3.5$ betrieben. Für eine Kaskade die mit UF_6 -H₂ mit $N_o^+ = 4.2 \%$, $P_o^+ = 240$ mbar, $\mathcal{J}_U^* = 1/4$ und $P_o^+ / P_1^+ = 2.1$ betrieben wird, ergibt sich bei einer Urantransportstörung ein Wert $\overline{\Delta N_o} / \overline{\Delta P_o} \approx 20$.

2.3.4 Störungen des Zusatzgastransportes τ_Z

Bei Abweichungen $\Delta \tau_Z$ des Zusatzgastransportes verschieben sich in Abb. 5 die Arbeitspunkte aller Trennstufen auf der Kurve $\tau_U = \tau_U^+$ und für kleine Änderungen in der Umgebung des Soll-Arbeitspunktes gilt analog zu Gl. (3) und (4):

$$\left. \frac{\overline{\Delta N}_o}{\overline{\Delta P}_o} \right|_{\tau_U^+} = \frac{P_o}{N_o} \frac{dN_o}{dP_o} = - \frac{P_o}{N_o} \frac{\partial \tau_U / \partial P_o}{\partial \tau_U / \partial N_o} \Bigg|_{N_o^+, P_o^+}, \quad (6)$$

woraus man das normierte Verhältnis $\overline{\Delta N}_o / \overline{\Delta P}_o$ der mittleren Sollwertabweichungen für diesen Fall mit $U_o = N_o L_o$ und mit $\tau_U = U_o (\mathcal{J}_U^+ / \mathcal{J}_U^* - 1)$ erhält:

$$\left. \frac{\overline{\Delta N}_o}{\overline{\Delta P}_o} \right|_{\tau_U^+} = - \frac{P_o}{N_o} \frac{(\mathcal{J}_U^+ - \mathcal{J}_U^*) \frac{\partial U_o}{\partial P_o} + U_o \frac{\partial \mathcal{J}_U}{\partial P_o}}{(\mathcal{J}_U^+ - \mathcal{J}_U^*) \frac{\partial U_o}{\partial N_o} + U_o \frac{\partial \mathcal{J}_U}{\partial N_o}} \Bigg|_{P_o^+, N_o^+} \quad (7)$$

Für eine ohne Entnahme betriebene Kaskade sind die Sollwerte $\mathcal{J}_U^+ = \mathcal{J}_U^*$ gleich dem nominellen UF_6 -Abschälverhältnis \mathcal{J}_U^* und es gilt dort exakt:

$$\left. \frac{\overline{\Delta N}_o}{\overline{\Delta P}_o} \right|_{\tau_U^+} = - \frac{P_o}{N_o} \cdot \frac{\partial \mathcal{J}_U / \partial P_o}{\partial \mathcal{J}_U / \partial N_o} \Bigg|_{P_o^+, N_o^+} \quad (8)$$

In guter Näherung gilt Gl. (8) auch in der Umgebung des Arbeitspunktes produzierender Kaskaden, da wegen der im Vergleich zum Urandurchsatz U_o der Stufen sehr kleinen Produktionstransporte P, W die normierten Werte $(\mathcal{J}_U^+ - \mathcal{J}_U^*) / \mathcal{J}_U^* = P / U_o, -W / U_o$ maximal einige Prozent betragen. Im Anreicherungsteil einer Kaskade liegen sie im Promillebereich und die damit bewerteten Glieder in Gl. (7) können daher vernachlässigt werden.

Damit ist bei Kenntnis der Komponentenkenfelder die Vorausberechnung des Verhältnisses $\overline{\Delta N}_o / \overline{\Delta P}_o$ bei Störungen des Zusatzgastransportes für beliebige Trenndüsenkaskaden

ebenfalls in einfacher Weise möglich.

Für beide Transportstörungen lassen sich keine verallgemeinerten Wertebereiche für das Verhältnis von $\overline{\Delta N}_O / \overline{\Delta P}_O$ angeben. Man kann aber mit Sicherheit ausschließen, daß in einer industriellen Anlage ein Arbeitspunkt gewählt wird, bei dem für Störungen von τ_U und τ_Z gleiche Werte $\overline{\Delta N}_O / \overline{\Delta P}_O$ auftreten, was nur der Fall wäre, wenn sich die Kurve $\tau_Z = \tau_Z^+$ und $\tau_U = \tau_U^+$ in einem Punkt berührten. Dies würde bedeuten, daß selbst geringe Zusatzgastransportstörungen Urantransportstörungen induzieren würden (bzw. auch umgekehrt), so daß eine gekoppelte Steuerung der beiden Ströme notwendig würde.

2.3.5 Ursachen für kollektive Störungen

Die Ursachen für fehlerhaft aufgeprägte Materialtransporte in einer eingeregelter Trenndüsenkaskade liegen in Abweichungen der äußeren Kaskadenströme (vgl. Abb. 3) von ihren Sollwerten:

Zusatzgasrückspeisestromstärke	$Z_R \neq \tau_Z^+$
Einspeisestromstärke	$F \neq \tau_{U,P}^+ + \tau_{U,W}^+$
Produktentnahmestromstärke	$P \neq \tau_{U,P}^+$
Abfallentnahmestromstärke	$W \neq \tau_{U,W}^+$
Uranrückspeisestromstärke	$U_R \neq U_R^+$ (vgl. S. 21)

Die Schwierigkeit der Einstellung der Stromstärken Z_R und U_R liegt weniger in der genauen Messung dieser Stromstärken, als in der ausreichend genauen Vorhersage der erforderlichen Sollwerte Z_R^+ und U_R^+ . Hier machen sich die fertigungsbedingten Streuungen der Stufenkennlinien bemerkbar, die für den Zusatzgastransport in der Kaskade als Ganzes ausgeglichen werden müssen, während für U_R die Kennlinie der Vorabscheidungs-trennstufe maßgeblich ist.

Bei der Inbetriebnahme werden also die theoretischen Sollwerte von U_R^+ und Z_R^+ eingestellt, die dann - mit der Kaskade als Meßinstrument - solange optimiert werden können, bis sich keine Verbesserung des Kaskadenzustandes insgesamt mehr ergibt.

In Abb. 6 sind die Auswirkungen einer Sollwertabweichung des Urantransportes für Kaskaden mit positivem σ_U (Abb. 6a) und mit negativem σ_U (Abb. 6b) auf die UF_6 -Konzentration N_O in einer Rechteckkaskade schematisch dargestellt. Die korrespondierenden Druckänderungen ΔP_O ergeben sich nach Vorzeichen und Betrag aus dem Transportediagramm bzw. aus Gl. (5).

Hieraus werden folgende Zusammenhänge deutlich:

- Eine Sollwertabweichung der Transporte beeinflusst einen Kaskadenabschnitt gleichmäßig. Die Wirkung auf die Betriebsbedingungen läßt sich für jeden Kaskadentyp nach den Gleichungen (5), (7) und (8) bzw. aus der Betrachtung der Transportediagramme vorhersagen.
- Eine mit den Anreicherungsaufgaben und dem Kaskadenaufbau unmittelbar übereinstimmende Aufteilung der Anlage in entsprechende Diagnoseabschnitte ermöglicht eine Unterscheidung kollektiv wirkender Störungsursachen. Eine Rechteckkaskade entsprechend Abb. 2 wird dazu beispielsweise in vier Abschnitte eingeteilt:

Abstreifeteil	kleine Stufen	- Fußkaskade
	große Stufen	- Basiskaskade
Anreicherungsteil	große Stufen	- Basiskaskade
	kleine Stufen	- Kopfkaskade

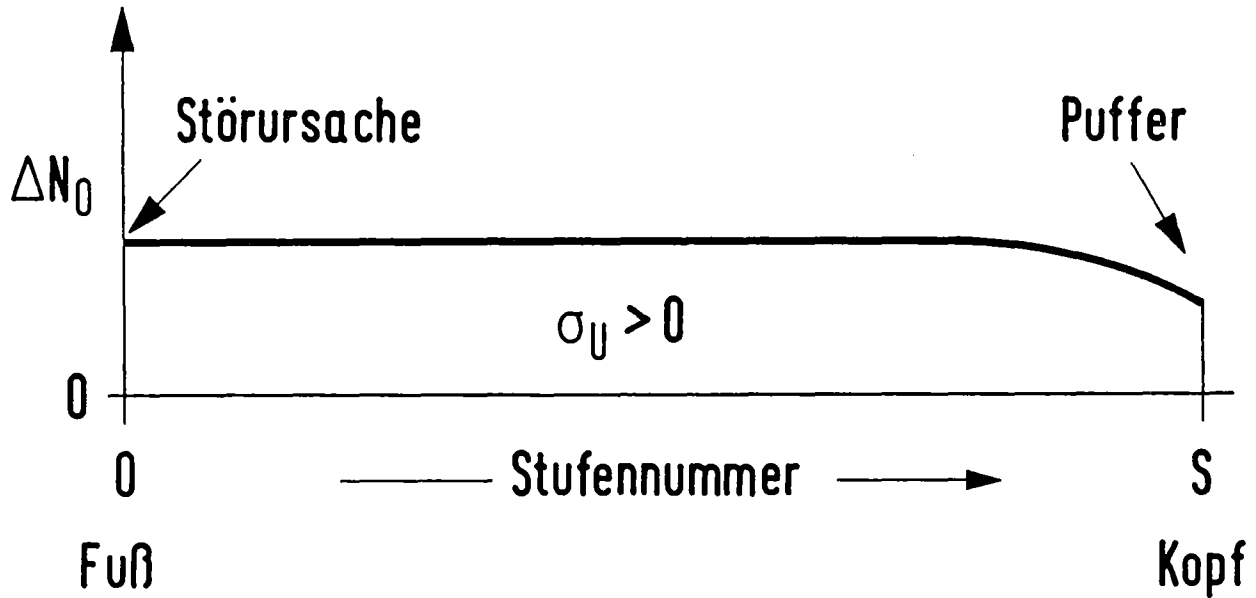


Abb. 6a: Die Auswirkungen eines zu großen Urantransportes in einem Kaskadenabschnitt mit positivem σ_U . Die Störungsursache, die entweder in zu großer Einspeisestromstärke F oder zu geringer Abfallentnahme W liegen kann, liegt am Fuß des betrachteten Abschnittes. Die kollektiven Änderungen ΔN_0 und ΔP_0 dieses Kaskadenabschnittes sind z. B. aus Abb. 5a zu entnehmen. Die Abnahme der Störwirkung am Puffer ist auf die korrekt eingestellte Uranrückspeisestromstärke U_R zurückzuführen, die auf den gestörten Zustand bezogen wie eine zu niedrig eingestellte Rückspeisung wirkt.

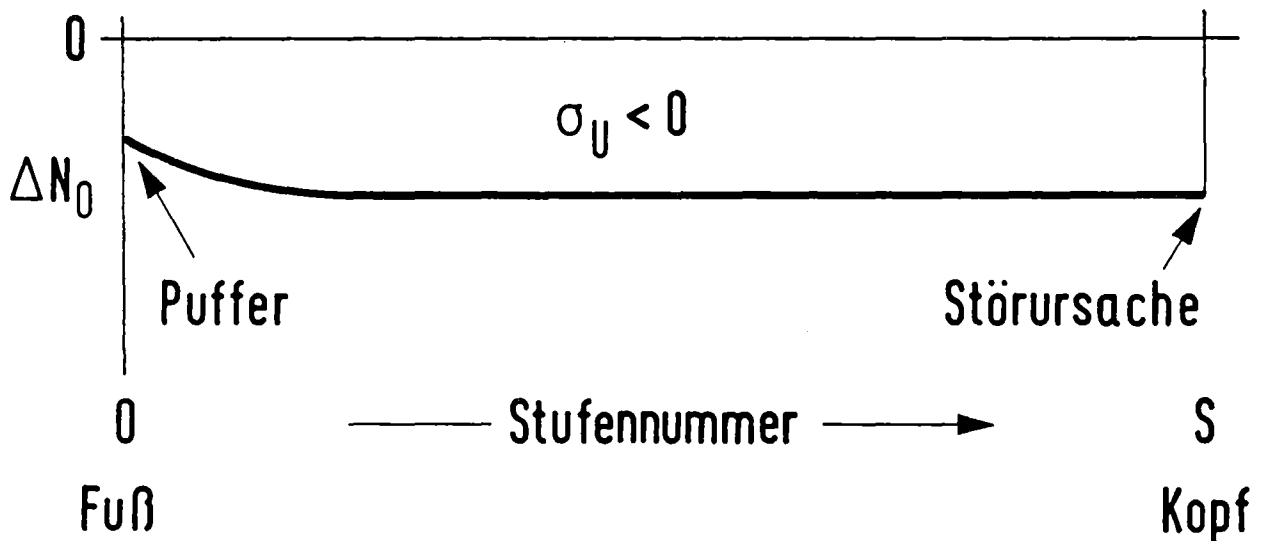


Abb. 6b: Zu großer Urantransport in einem Kaskadenabschnitt mit negativem σ_U . Die Störungsursache ist entweder eine zu große Produktentnahmestromstärke P oder eine zu geringe Einspeisestromstärke F. Die kollektiven Änderungen ΔN_0 und ΔP_0 können z. B. Abb. 5b entnommen werden.

Wegen der unterschiedlichen Stufendurchsätze ist in allen vier Abschnitten das Verhältnis von Urantransport zu Uranstufendurchsatz τ_U^+/U_O^+ verschieden. Für eine vorgegebene Transportstörung $\Delta\tau_U$ sind die Sollwertabweichungen ΔN_O und ΔP_O in den einzelnen Abschnitten hierzu proportional.

2.4 Lokale Störungen

Hier werden zunächst lokale, stationäre Störungen innerhalb eines Kaskadenabschnittes betrachtet, die aus der Veränderung von Komponenteneigenschaften in einer einzelnen Stufe innerhalb des betrachteten Kaskadenabschnittes herühren. Es hat sich gezeigt, daß bei Überlagerungen der Auswirkungen benachbarter Störungsursachen durch Ausregelung und Beseitigung der überwiegenden Störungswirkung (maximalen Störung) das Problem mit den für die isolierte Störung gültigen Kenntnissen schrittweise gelöst werden kann (s. Einregelungsverfahren in Abschnitt 3.3).

Folgende lokale Störungsursachen und Fehlerquellen sollen im einzelnen betrachtet werden:

1. Veränderung der Abschälverhältnisse einer Stufe
 - durch Rückstaufehler
 - durch Änderung der Abschälergeometrie
2. Veränderung des Kompressionsverhältnisses eines Stufenverdichters.
3. Fehlerhafte UF_6 -Rückspeisestromstärke U_R *)
4. Meßgerätefehler an einer Einzelmeßstelle

*) Eine fehlerhafte Uranrückspeisestromstärke bewirkt z. B. an der Kaskadenschulter des Anreicherungssteils (vgl. Abb. 2) bei positivem σ_U für die Basiskaskade eine lokale Störung, für die Kopfkaskade jedoch eine Urantransportstörung. Bei negativem σ_U ist die Wirkung umgekehrt. Da die Urantransportstörung bereits behandelt wurde, wird die Uranrückspeisestromstärke Störung in diesem Abschnitt als lokale Störung angesehen.

Diese Störungen führen in einem begrenzten Bereich um die Störstelle zu Sollwertabweichungen der Betriebsgrößen P_0 und N_0 , die zugleich mit Verschiebungen der Uranstufeninventare und Veränderungen der Uranstufendurchsätze verbunden sind. Abb. 7 zeigt als Beispiel den Zeitverlauf einer sprunghaft aufgeprägten Rückstauung in einer Kaskade mit den Komponenteneigenschaften der Pilot-Anlage /12/. Man erkennt, daß die mit den bleibenden Konzentrationsabweichungen verbundene Inventarerhöhung durch eine Inventarentnahme aus den kaskadenaufwärtsliegenden Nachbarstufen sehr rasch aufgebaut ist. Dadurch ist das charakteristische Störungsprofil im allgemeinen bereits voll ausgebildet, bevor noch die Inventarverschiebung einen größeren Kaskadenbereich durchlaufen hat. Die Wanderungsrichtung und -geschwindigkeit der Inventarverschiebung sowie die Größe der verbleibenden Sollwertabweichungen sind eine Funktion der Größe und des Vorzeichens des Stabilitätsparameters σ_U .

Für die Erkennung einer lokalen Störung liegt also nach kurzer Zeitspanne ein nahezu stationäres Störungsprofil der Betriebsbedingungen N_0 , P_0 vor, welches für alle Störungsarten dadurch gekennzeichnet ist, daß in der Nachbarschaft der gestörten Stufe Maxima $\hat{\Delta N}_0$ und $\hat{\Delta P}_0$ auftreten, von wo aus die Störungsauswirkungen ΔN_0 , ΔP_0 über eine begrenzte Stufenzahl beiderseits der Störstelle rasch abklingen. Diese typische Form eines lokalen Störungsprofils ist in Abb. 7 deutlich zu sehen.

Ein derartig stationäres Störungsprofil ist grundsätzlich so aufgebaut, daß durch den gestörten Kaskadenbereich die Sollwerte τ_U^+ und τ_Z^+ der Transporte unverändert hindurch gefördert werden. Daher können nicht $1/\lambda_U^*$ benachbarte

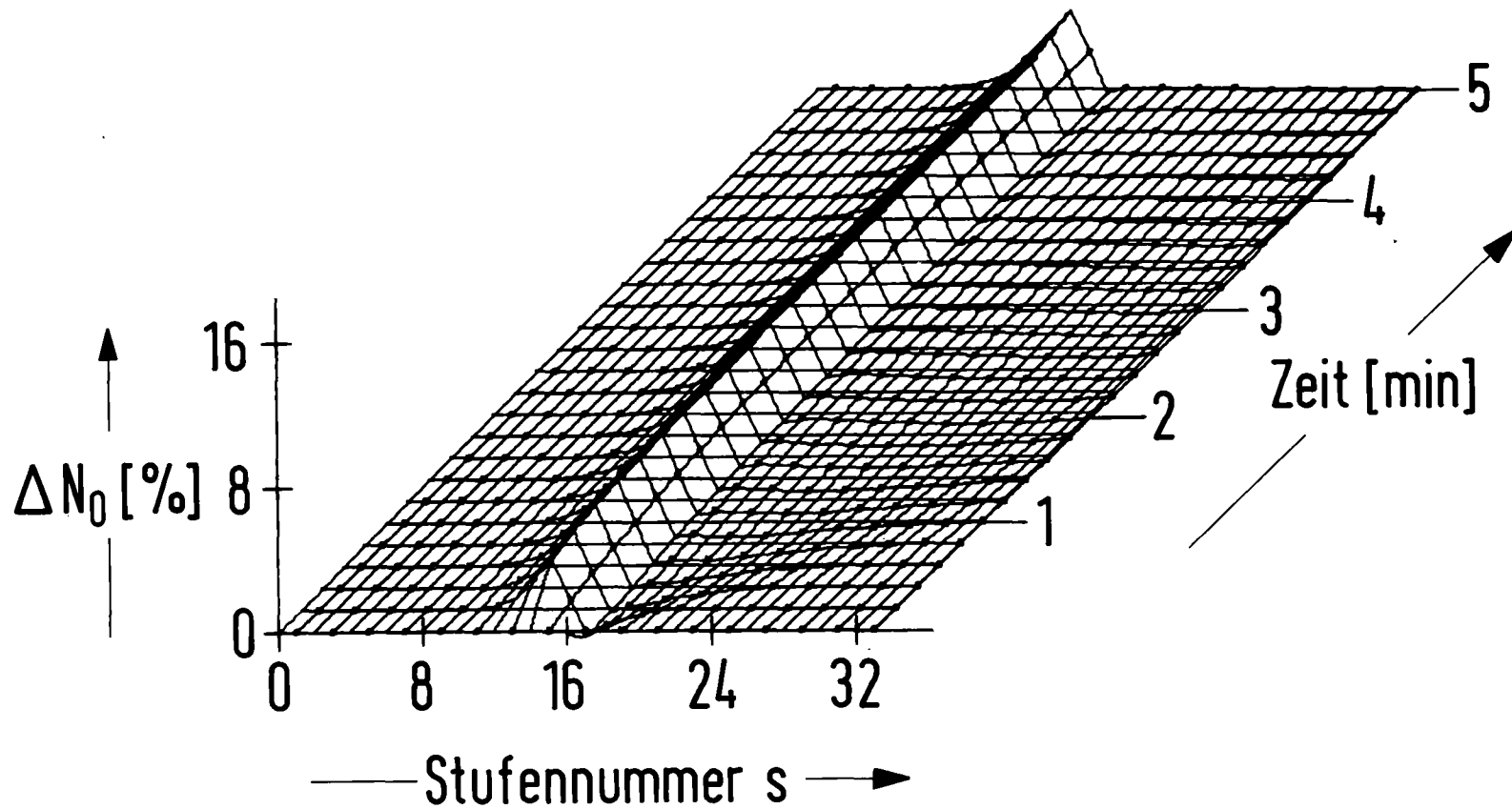


Abb. 7: Der zeitliche Aufbau eines Konzentrationsprofils ΔN_0 nach einer sprunghaften Rückstauung in der Stufe 15 einer Kaskade mit $J_U^* = 1/2$ und den Komponenteneigenschaften der Pilot-Anlage (nach /12/).

Stufen gleichgroße, aber von den Sollwerten P_0^+ , N_0^+ unterschiedliche Betriebsbedingungen aufweisen, da hieraus Sollwertabweichungen der Transporte resultieren würden. Aus diesem Grund kann man für alle stationären lokalen Störungen ein nahezu dreieckiges Störungsprofil erwarten. Hiernach lassen sich für die Verhältnisse der Maximalwerte $\hat{\Delta N}_0 / \overline{\Delta N}_0$, $\hat{\Delta P}_0 / \overline{\Delta P}_0$ zu den mittleren Sollwertabweichungen im gestörten Bereich Werte im Bereich um 2 erwarten. Diese Werte werden dann oberhalb 2 liegen, wenn das Störungsprofil gegenüber der Dreiecksform eingezogen ist und wenn der Bereich der Mittelwertbildung größer als der gestörte Bereich ist.

Damit ist eine Unterscheidung allgemeiner Art gegenüber kollektiven Störungen gegeben. Dies zeigen auch die in Abb. 4 aufgetragenen Meßergebnisse, die für die nachfolgend im einzelnen diskutierten Ursachen lokaler Störungen in Versuchen mit der Pilot-Anlage erhalten wurden.

2.4.1 Rückstaustörung in einer Trennstufe

Eine Rückstaustörung wie auch jede Änderung der Abschälergeometrie bewirkt gleichsinnige Veränderungen des Uran- und des Zusatzgasabschälverhältnisses in der betroffenen Düse. Die Ursachen für diese Störungsart können in einer Verstellung oder Veränderung des Rückstauventils, wie auch in einer Veränderung der Düse selbst oder in Ablagerungen in ihren Strömungskanälen liegen. In diesem Sinne ist eine Erhöhung der Abschälverhältnisse durch erhöhten Rückstau einer aus anderen Ursachen bewirkten \hat{J}_U , \hat{J}_Z -Erhöhung gleichwertig. Beide können durch entsprechende Erniedrigung des Rückstaus ausgeglichen werden.

Ein wesentliches Kennzeichen dieser Störungsart ist die

unmittelbare Wirkung der eigentlichen Ursache auf die Abschälverhältnisse \mathfrak{J}_U und \mathfrak{J}_Z einer Stufe, die die Sollwertabweichungen von N_O und P_O in den benachbarten Stufen hervorrufen, während die im folgenden Abschnitt beschriebene Verdichterstörung direkt auf die Abschälverhältnisse von zwei Stufen einwirkt. Man erkennt dies in Abb. 8, die eine Versuchsreihe mit der Pilot-Anlage wiedergibt, bei der in der eingeregelter Kaskade das Rückstauventil der Stufe 8 stufenweise zuge dreht wurde, bis eine maximale Sollwertabweichung in der Konzentration von mehr als 30 % registriert wurde.

2.4.2 Störung des Kompressionsverhältnisses eines Verdichters

Eine Störung des Kompressionsverhältnisses eines Verdichters hat als wesentliche Folge eine entsprechende Änderung im Ansaugdruck des betroffenen Verdichters. Dadurch werden gleichzeitig zwei Stufen betroffen: An der Trenndüse, deren leichte Fraktion abgesaugt wird, ändert sich das Expansionsverhältnis und an der Düse, deren schwere Fraktion angesaugt wird, wird der Rückstau mit der oben beschriebenen Wirkung beeinflusst. Die Änderung des Expansionsverhältnisses an einer Düse bewirkt eine gegensinnige Beeinflussung der Abschälverhältnisse: Wird das Expansionsverhältnis z. B. größer, so erhöht sich das Zusatzgasabschälverhältnis während das Uranabschälverhältnis kleiner wird. Da der Hauptanteil der Wirkung auf Druck und Konzentration von dem veränderten Rückstau ausgeht, ist in ΔN_O , ΔP_O das Erscheinungsbild der Verdichterstörung dem der Rückstau störung zwar ähnlich, jedoch erlauben die relative Lage der Maxima $\Delta \hat{N}_O$, $\Delta \hat{\mathfrak{J}}_U$, $\Delta \hat{\mathfrak{J}}_Z$ und ihre Vorzeichenrelationen eine klare Unterscheidung von der vorhergegangenen Störungsart (vgl. hierzu Abb. 9).

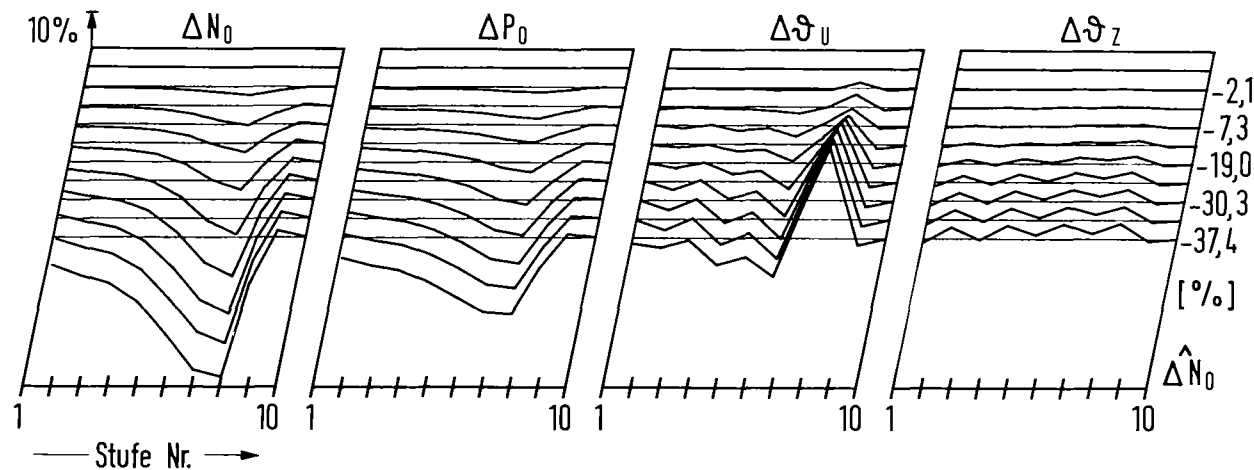


Abb. 8: Die Wirkung von unterschiedlich großen Störungen im Rückstau der Stufe Nr. 8 auf die Betriebsbedingungen N_0 , P_0 , \mathfrak{J}_U , \mathfrak{J}_Z . Die Zahlenwerte am rechten Rand der Spalte $\Delta\mathfrak{J}_Z$ geben die Größe der maximalen Konzentrationsabweichung an, die jeweils zu einer bestimmten Stellung des Rückstauventils gehören. Die alternierenden Abweichungen der Abschälverhältnisse von dem erwarteten Verlauf unterhalb der Störstelle resultieren zum großen Teil aus Konzentrationsmeßgerätefehlern, die jedoch die für die Störungsdiagnose signifikante relative Lage der maximalen Abweichungen zueinander nicht beeinflussen.

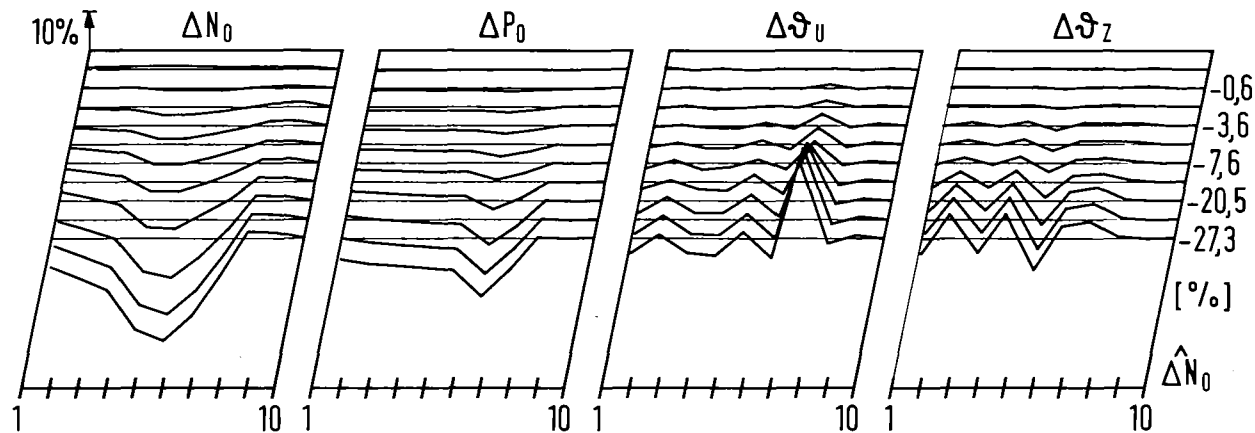


Abb. 9: Die Wirkung unterschiedlich großer Störungen des Expansionsverhältnisses an der Düse Nr. 5, die durch eine systematische Verstellung des Verdichternebenschlußventiles NV 5 erzeugt wurden. Bei der Berechnung der Abschälverhältnisse bei diesem Versuch ergibt sich zusätzlich zum Einfluß der Konzentrationsmessung ein Fehler durch den Einfluß des Expansionsverhältnisses auf die Durchsatzberechnung. Man erkennt die gegenläufige Änderung $\Delta\mathfrak{J}_U$ und $\Delta\mathfrak{J}_Z$ in Stufe 5 durch das veränderte Expansionsverhältnis und die gleichsinnige Änderung $\Delta\mathfrak{J}_U$ und $\Delta\mathfrak{J}_Z$ in Stufe 7, die von verändertem Rückstau herrührt.

2.4.3 Unterscheidung von Rückstau- und Verdichter- störung

Bei einer Rückstaustörung haben $\Delta \hat{V}_U$ und $\Delta \hat{V}_Z$ das gleiche Vorzeichen ($\Delta \hat{V}_U \cdot \Delta \hat{V}_Z > 0$) und liegen in der gleichen Stufe: $S(\Delta \hat{V}_U) = S(\Delta \hat{V}_Z)$. Die zusätzliche Überprüfung, ob $\Delta \hat{V}_U$ und $\Delta \hat{N}_O$ entgegengesetzte Vorzeichen haben ($\Delta \hat{V}_U \cdot \Delta \hat{N}_O < 0$) und in benachbarten Stufen liegen ($0 < S(\Delta \hat{V}_U) - S(\Delta \hat{N}_O) < 3$) stellt eine praktisch vollständige Absicherung der Diagnose dar. Ob der Rückstau zu groß oder zu klein ist, ergibt sich unmittelbar aus $\Delta \hat{V}_U$, $\Delta \hat{N}_O$ und σ_U : wenn $\Delta \hat{N}_O \cdot \sigma_U > 0$, dann ist der Rückstau zu klein und umgekehrt. Die Störung liegt in der Stufe $S(\Delta \hat{V}_U)$.

Bei einer Verdichterstörung besitzen $\Delta \hat{V}_U$ und $\Delta \hat{V}_Z$ entgegengesetztes Vorzeichen und liegen $1/\hat{V}_U^*$ Stufen auseinander, weil die Zusammenführung der schweren Fraktion einer Stufe ($S + 1$) mit der leichten Fraktion der Stufe ($S - 1/\hat{V}_U^*$) auf der Saugseite des Verdichters erfolgt, der das Verfahrensgas der Stufe S fördert. Ein negatives Vorzeichen von $\Delta \hat{V}_Z$ bedeutet ein verringertes Kompressionsverhältnis des Stufenverdichters in der darüberliegenden Stufe. Da die Hauptwirkung von $\Delta \hat{V}_U$ auf $\Delta \hat{N}_O$ identisch ist wie bei der Rückstau

störung, kann zur Diagnoseabsicherung das gleiche redundante Merkmal wie bei der Rückstau

störung verwendet werden. Ein zu kleines Expansionsverhältnis erkennt man daher zusätzlich an einem negativen Wert von $\sigma_U \cdot \Delta \hat{N}_O$. Die Verdichterstörung liegt in der Stufe $S(\Delta \hat{V}_U) - 1$.

2.4.4 Fehlerhafte UF₆-Rückspeisestromstärken U_R der UF₆- Abscheidungsanlagen

Soweit nach den Betrachtungen des Abschnittes 2.1 sich diese Störungen nicht als kollektive Transportstörung auf

den gesamten Kaskadenabschnitt auswirken, verursachen sie eine lokale Störung am Fuß bzw. Kopf des betreffenden Abschnittes, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die maximale Konzentrationsabweichung $\hat{\Delta N}_O$ in der Fußstufe $S = 1$ bzw. in der Kopfstufe $S = SK$ liegt (vgl. Abb. 6). Das Vorzeichen der Strömstärkeabweichung ΔU_R ist gleich dem Vorzeichen der Konzentrationsabweichung $\hat{\Delta N}_O$.

2.4.5 Die Erkennung von Meßgerätefehlern

Bei allen gasdynamischen, lokalen Störungen, die bisher untersucht wurden, wurde ein gleichzeitiges, gleichsinniges Auftreten von Druck und Konzentrationsabweichungen beobachtet, d. h. bei gasdynamischen Störungen sind die Abweichungen von Druck und Konzentration ΔN_O , ΔP_O in der gleichen Stufe komplementär. Bei einer Fehlanzeige eines Druck- oder Konzentrationsmeßgerätes fehlt diese Komplementärabweichung. Daher wird jede Abweichung, die eine Störungsdiagnose auslöst, grundsätzlich mit ihrer Komplementärabweichung verglichen. Ist sie unverhältnismäßig groß gegenüber der Komplementärabweichung, so handelt es sich um einen Meßgerätefehler.

3. Die Methodik der Störungsdiagnose

Die Durchführung der Störungsdiagnose erfolgt mit Hilfe des für die allgemeine Kaskadenüberwachung eingesetzten Digitalrechners und bedient sich zum Teil der von diesem für andere Aussageziele aufbereiteten Daten aus dem Meßwerterfassungs- und Verarbeitungssystem der Kaskade. Das Gesamtsystem liefert eine Kaskadenzustandsanalyse, in der die beschriebene Störungsdiagnose in zwei Stufen, erstens zur schnellen Identifizierung von akuten Störungen und zweitens zur Erkennung langsamer Störungsabläufe eingesetzt wird.

Für die praktische Erprobung der hier beschriebenen Methode wurde das Diagnose-Programm als Kurzzeitdiagnose zusammen mit einem Kaskadenüberwachungsprogramm für die Pilot-Anlage auf einem Kleinrechnersystem^{*)} implementiert, das unter technischen Bedingungen im ONE LINE-Betrieb arbeitet und zur Übersichtsinformation neben üblichen Datensichtgeräten mit einem unmittelbar angekoppelten Farb-Graphik-System ausgestattet ist^{**)}.

3.1 Kaskadenüberwachung mit gestaffelter Störungsdiagnose

Der Ablauf der Überwachung und Analyse des Kaskadenzustandes für eine industrielle Kaskade ist in dem Blockschema der Abb. 10 skizziert.

3.1.1 Meßwerterfassung und Datennormierung

Die Kaskade wird mit einer minimalen Meßgerätebestückung - im Mittel 2 ÷ 3 Meßgeräte je Stufe - überwacht. Die

*)

WANG 2200 VP. Vertrieb: Wang Labs. 6 Frankfurt, Moselstr. 4

**)

Farb-Graphic-Video-Display-System FVDS (Lizenz KfK),
Hersteller: Dr. Seufert GmbH. 75 Karlsruhe 41, Rossweid 5

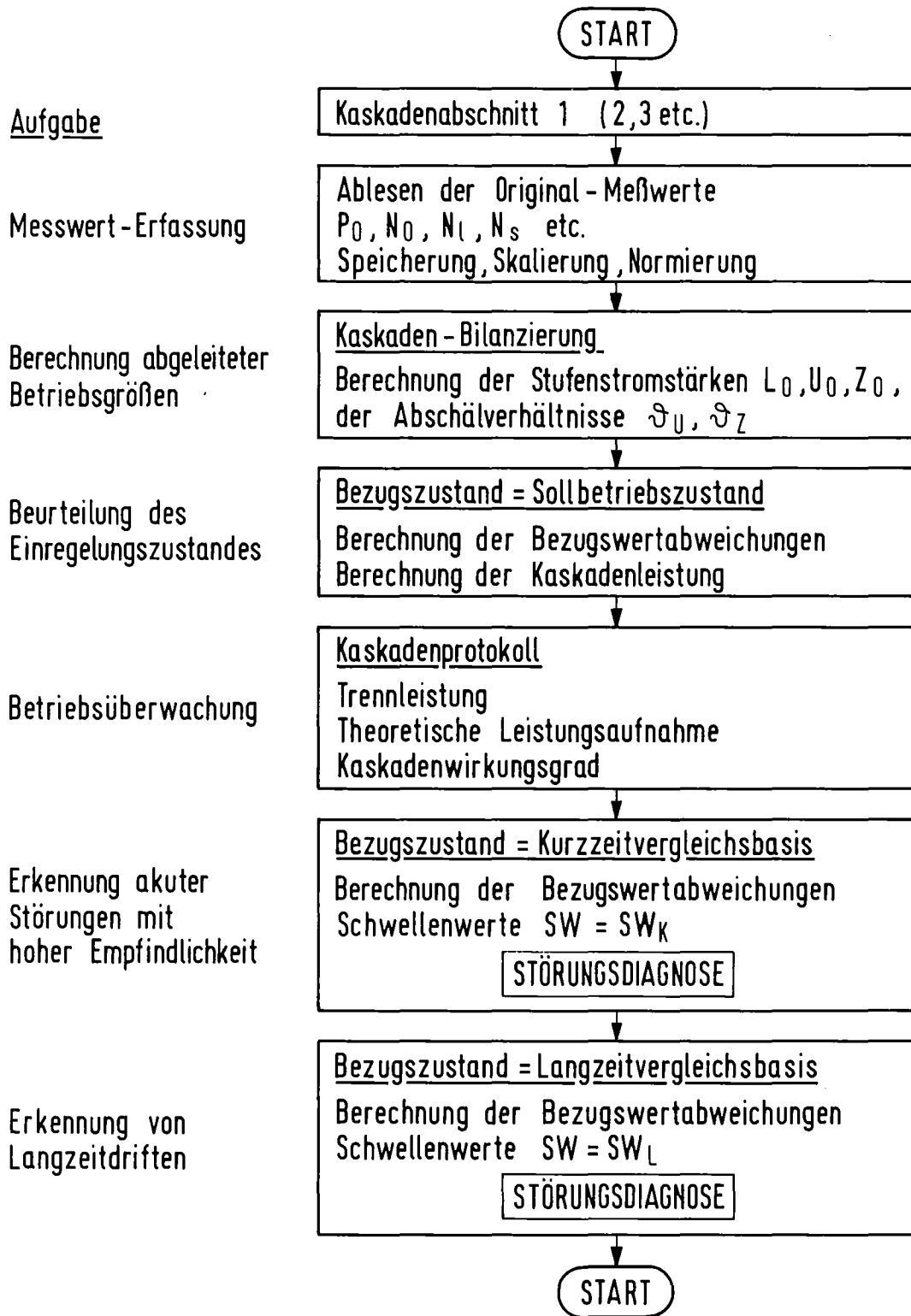


Abb. 10: Ablaufschema für die Durchführung der Kaskadenüberwachung mit einer gestaffelten Störungsdiagnose

gemessenen Primärdaten sind die Vordrucke $P_O(s)$ und die UF_6 -Molenbrüche $N_O(s)$ aller Stufen (s) und zusätzlich die UF_6 -Molenbrüche $N_L(s')$, $N_S(s')$ in den zu Bilanzierungszwecken benutzten Knotenpunkt-Stufen (s') /12/*). Dazu kommen die verschiedenen Stromstärke-Messungen an den Ein- und Rückspeisestellen für UF_6 und die Zusatzgas-Rückführung. Diese Primärdaten werden skaliert und in normierter Form für die Berechnung der abgeleiteten Betriebsgrößen zur Verfügung gestellt. Aus ihnen werden unter Benutzung der Durchsatz-Charakteristik der Trenndüsen die Stufendurchsätze $L_O(s)$, $U_O(s)$ und $Z_O(s)$ berechnet und mit Hilfe der Materialstrombilanzen die Abschälverhältnisse $\mathfrak{J}_U(s)$ und $\mathfrak{J}_Z(s)$ in allen Stufen ermittelt.

3.1.2 Beurteilung des Einregelungszustandes

Aus einem ersten Vergleich der Meßwerte mit den Sollwerten erfolgt eine Beurteilung des Einregelungszustandes der Kaskade in Bezug auf den Auslegungszustand oder einen anderen erwünschten Sollzustand. Die Qualität der gasdynamischen Kaskaden-Einregelung kann dabei objektiv mit Hilfe der Varianz der verschiedenen Sollwertabweichungen beurteilt werden. Aus einem Vergleich der Standardabweichungen mit der entsprechenden Absolutgenauigkeit der Meßgeräte und der resultierenden Fehlerfortpflanzung ergibt sich eine Bewertung der Möglichkeit, eine verbesserte gasdynamische Einregelung der Kaskade zu erzielen (vgl. Abschnitt 3.3).

) Da bei der Bestimmung der Abschälverhältnisse mit Hilfe von Bilanzrechnungen sich die Meßgerätefehler fortpflanzen, wird innerhalb der Kaskade in bestimmten Abständen in einer Anzahl ($1/\mathfrak{J}_U^$) nebeneinander liegender Stufen die UF_6 -Konzentration in den drei Fraktionen des Verfahrensgases gemessen. Dies erlaubt sowohl eine von der Bilanzrechnung unabhängige Bestimmung der Abschälverhältnisse als auch eine Überprüfung der Transporte innerhalb der Kaskade.

3.1.3 Erkennung von akuten Störfällen (Kurzzeit-Diagnose)

Für die Diagnose neu auftretender Fehlerursachen kann unbeschadet des Vorliegens noch nicht voll ausgeregelter sonstiger Störungen eine hohe Nachweisgenauigkeit und Ansprechempfindlichkeit erreicht werden, wenn für die Bildung der Betriebswertabweichungen als "Kurzzeit-Bezugsbasis" ein Betriebszustand gewählt wird, der unter dem Gesichtspunkt der Kaskadeneinregelung oder im Abschluß an eine Störungsbeseitigung als derzeitiger "Bestwert" angesehen werden kann. Dieses geschieht in einfacher Weise dadurch, daß zu einem geeigneten Zeitpunkt der tatsächliche Meßdatensatz als Bezugsbasis in das Kaskadenüberwachungsprogramm übernommen wird.

Bei diesem Vorgehen wird die Diagnosegenauigkeit allein durch die Reproduzierbarkeit der verwendeten Meßanordnungen bestimmt und ist von den wesentlich größeren Absolutfehlern, Meßgerätestreuungen und Driftfehlern unabhängig. Entsprechend niedrig können die Schwellenwerte SW_K gesetzt werden, oberhalb derer die Diagnose zuverlässig arbeitet und entsprechend hoch ist die frühzeitige Fehler-Erkennungsmöglichkeit. Die Kurzzeit-Bezugsbasis kann in beliebigen Zeitabständen neu gesetzt werden, bei Bedarf mehrmals täglich, wenn z. B. ein tageszeitlicher Trend wie die Änderung der Kühlwassertemperatur o. ä. ausgeregelt werden soll.

3.1.4 Erkennung von driftenden Störungen (Langzeit-Diagnose)

Da die hohe Diagnose-Genauigkeit für Kurzzeiteffekte mit der Einführung einer "schwimmenden" Bezugswertbasis erreicht wird, ist eine Kontrolle des Absolutzustandes in

größeren Zeitabständen erforderlich. Wegen der in den Kaskaden zu erwartenden Exemplarstreuungen von Komponenteneigenschaften (Trenndüsen, Verdichter etc.) eignen sich hierfür die Auslegungsbetriebszustände oder andere einheitlich festgelegte Sollwerte nur bedingt. Es ist vielmehr zweckmäßig als Bezugsbasis ausgewählte Betriebszustände der Kaskade zu wählen, die unter definierten Verhältnissen gemessen wurden und durch längere, störungsfreie Betriebsperioden eine eichfähige Kontrolle der Trennleistung erlauben. Wenn nicht einer Gesamtdrift der Anlage gegenzusteuern ist, werden bei diesem Diagnoseschritt vor allem individuelle Meßgerätedriften (wenn sie unregelmäßig in der Anlage verteilt auftreten) erkennbar werden, die bei der Kurzzeitdiagnose ausgepegelt wurden.

3.2 Die Durchführung der Störungsdiagnose

Nach dem Auswählen der Schwellwerte für den gewünschten Anwendungsfall (SW_K : Kurzzeitdiagnose; SW_L : Langzeitüberprüfung) beginnt die Störungsdiagnose nach dem Ablaufschema der Abb. 11 zunächst mit einer Überprüfung auf Überschreitung dieser Schwellen. Falls keine Überschreitung festgestellt wird, liegt keine untersuchenswerte Störung vor.

Werden die Maximalwertschwellen SW_1 oder SW_2 überschritten, wird als erstes geprüft, ob ein Meßgerätefehler vorliegt. Hierzu werden entsprechend Abschnitt 2.4.5 die Komplementärabweichungen mit den maximalen Abweichungen $\hat{\Delta N}_0$ oder $\hat{\Delta P}_0$ verglichen, die den entsprechenden Schwellenwert SW_1 oder SW_2 überschritten haben. Weist dieser Vergleich auf einen Meßgerätefehler hin, so wird die Diagnose mit der Meldung dieser Störung beendet.

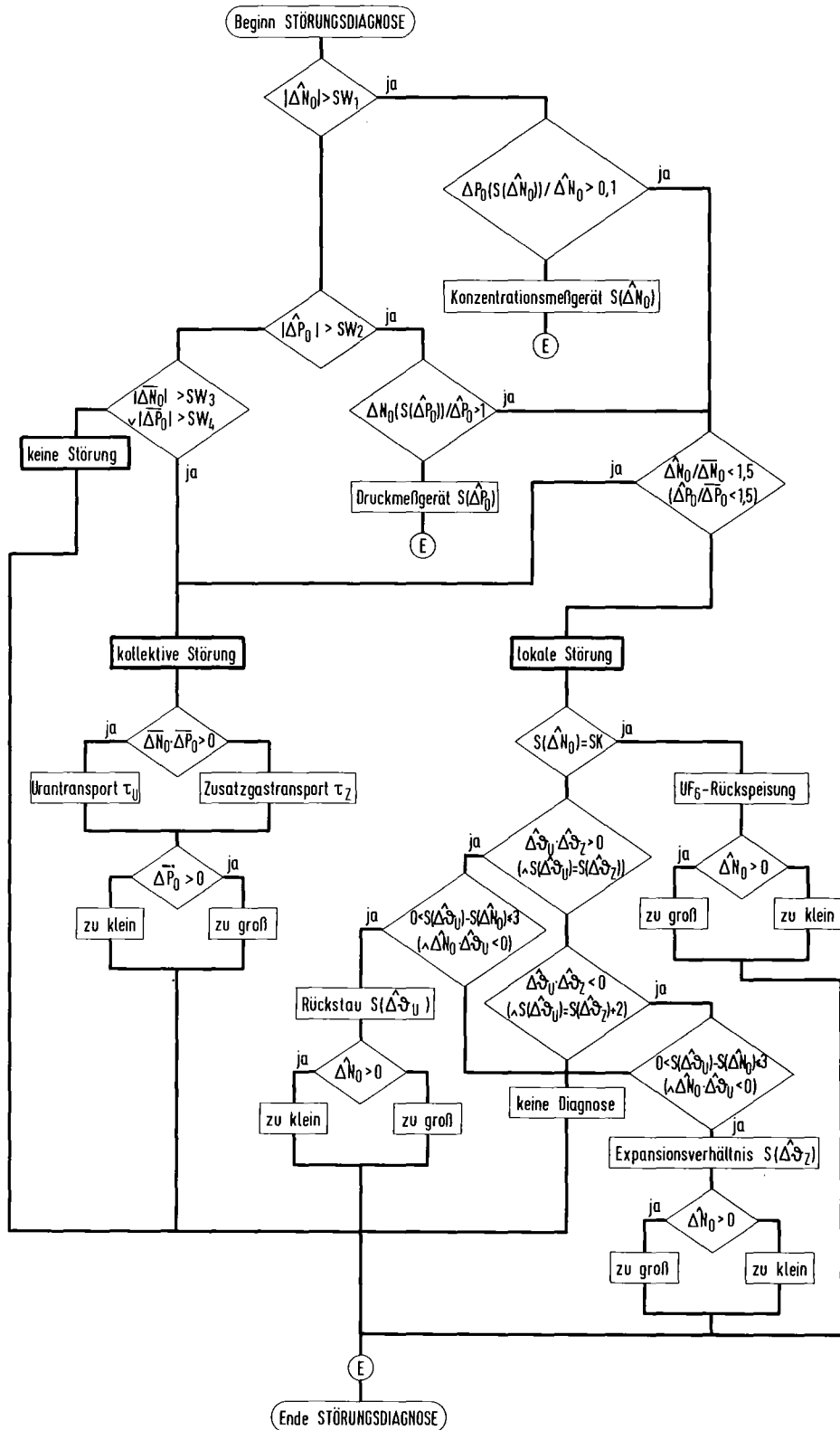


Abb. 11: Ablaufschema der Störungsdiagnose für eine Kaskade mit $\sigma_U = 1/2$ und $\sigma_U > 0$ (Pilot-Anlage). Die Diagnose in diesem Schema läuft von oben nach unten. Die eingeklammerten Beziehungen sind redundant. Die verwendeten logischen Operatoren bedeuten: v = ODER, ^ = UND.

3.2.1 Unterscheidung zwischen kollektiven und lokalen Störungen

In der Schwellenwertüberprüfung ist bereits eine erste Unterscheidung zwischen kollektiven und lokalen Störungen enthalten. Liegen die maximalen Abweichungen $\Delta\hat{N}_0$, $\Delta\hat{P}_0$ dem Betrage nach zwar unter den Schwellenwerten SW_1 und SW_2 , die mittleren Abweichungen $\overline{\Delta N}_0$ bzw. $\overline{\Delta P}_0$ jedoch über den wesentlich niedriger anzusetzenden Schwellenwerten SW_3 bzw. SW_4 , so liegt eine kollektive Störung vor, deren Ursache im linken Strang des Ablaufschemas analysiert wird.

Bei Überschreiten der Maximalwertschwellen SW_1 oder SW_2 erfolgt die Unterscheidung aufgrund der Verhältnisse $\Delta\hat{N}_0/\overline{\Delta N}_0$ und $\Delta\hat{P}_0/\overline{\Delta P}_0$ wie in Abschnitt 2.2 und Abb. 4 dargestellt wurde. Da in größeren Kaskaden mit gleichzeitigem Auftreten mehrerer lokaler Störungen zu rechnen ist, wird der Diagnosebereich auf eine bestimmte Stufenzahl x oberhalb und y unterhalb der Maximalstörung begrenzt und somit wird zunächst die Störung mit den größten Störungsauswirkungen analysiert. Die optimale Breite $x + y$ dieses "Diagnosefensters" wird durch den Betrag des Stabilitätsparameters σ_U bestimmt, für industrielle Kaskaden dürfte sie zehn bis fünfzehn Stufen betragen. Ihre günstigste Festlegung ist bei Betriebsbeginn auch in einer uneingeregelten Kaskade unmittelbar aus der Betrachtung eines gezielt erzeugten Störungsprofils abzuleiten. Daneben kann sie durch geeignete Simulationsrechnungen vorausbestimmt werden.

3.2.2 Erkennung der Ursachen bei kollektiven Störungen

Wie in Abschnitt 2.1 gezeigt wurde, kann die Unterscheidung zwischen Störungen des Zusatzgastransportes und des Urantransportes durch Vergleich des gemessenen Quotienten $\overline{\Delta N}_O / \overline{\Delta P}_O$ mit dem Ergebnis der Gl. (5) für die Urantransportstörung bzw. mit der Gl. (8) für die Zusatzgastransportstörung erfolgen. Wenn, wie in den Beispielen der Abbildungen 5a und 5b zu sehen ist, der Quotient $\Delta N_O / \Delta P_O$ für die Zusatzgastransportstörung ein negatives und für die Urantransportstörung ein positives Vorzeichen besitzt, kann eine Unterscheidung allein nach dem Vorzeichen erfolgen. Deshalb wird im Ablaufschema Abb. 11 die vereinfachte Unterscheidung mit Hilfe des Produkts $\overline{\Delta N}_O \cdot \overline{\Delta P}_O < 0$ durchgeführt. Aus den Transport-Diagrammen (Abb. 5) kann der Zusammenhang zwischen dem Vorzeichen der Störungsursache und dem Vorzeichen von $\overline{\Delta N}_O$ oder $\overline{\Delta P}_O$ erkannt werden.

3.2.3 Diagnose lokaler Störungen

Fehler in den Rückspeisestromstärken U_{R-} der Abscheidungsanlagen werden daran erkannt, daß die maximale Konzentrationsstörung am Kopf oder Fuß einer Kaskade auftritt. Bei positivem σ_U gilt dies für die Abscheidung am Kaskadenkopf ($S(\hat{\Delta N}) = SK$), für negative σ_U -Werte trifft dies für die Tails-Austragung ($S(\hat{\Delta N}) = 1$) im Abstreifeteil einer Kaskade zu (Abb. 6).

Die Unterscheidung der Rückstau-Störungen von Verdichter-Störungen erfolgt anhand der in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen doppelt redundanten Merkmale 1.) gleiches Vorzeichen und gleiche Stufe für $\Delta \hat{J}_Z$ und $\Delta \hat{J}_U$ bei Rückstau-Störung, 2.) Vorzeichenbeziehung $\sigma_U \cdot \Delta \hat{N}_O \cdot \Delta \hat{J}_U > 0$ und Lage von $\Delta \hat{N}_O$ und $\Delta \hat{J}_U$ in bestimmten Stufen. Die zu erwartenden Stufenabstände sind abhängig von J_U^* und σ_U .

In Abb. 11 sind die Stufenzahlen der Pilot-Anlage eingesetzt. Die Identifizierung der Verdichterstörung beruht nach Abschnitt 2.2.3 auf dem Vorzeichenunterschied von $\Delta \hat{J}_Z$ und $\Delta \hat{J}_U$ und der Lage in bestimmten Stufen. Daneben gilt wegen der überwiegenden Rückstauauswirkungen ebenso das redundante Merkmal 2.) der Rückstaustörung mit entsprechend unterschiedlicher Lage zur Störungsursache.

In allen identifizierten Störfällen wird die Diagnose durch die Feststellung des Vorzeichens der Störungsursache und durch Angabe der Stufennummer abgeschlossen, in der die Störungsursache liegt. Als Beispiel ist in Abb. 12 das Ergebnis einer mit der Pilot-Anlage durchgeführten Störungsdiagnose gezeigt. Es enthält die graphische Darstellung der Sollwertabweichungen über der Stufenzahl bei Vorliegen einer Verdichterstörung in der Pilot-Anlage zusammen mit dem Diagnoseergebnis und dem Diagnoseprotokoll.

3.3 Die Anwendung der methodischen Ansätze zum Erkennen gasdynamischer Störungen bei der Einregelung von Trenndüsenkaskaden

Wenn eine in Betrieb gehende Kaskade erstmalig in ihren Sollbetriebszustand eingeregelt wird, oder wenn eine Kaskade wegen einer Änderung der Produktionsaufgabe oder aus anderen betrieblichen Gründen in einen neuen Betriebszustand eingeregelt werden soll, lassen sich die methodischen Ansätze der Störungsdiagnose zu einer rasch in den Sollzustand führenden Einregelungsprozedur zusammenstellen.

In diesen Fällen liegen statistisch verteilte oder systematische Überlagerungen von Störungen vor, die in einem schrittweisen Vorgehen durch Ausregeln der jeweils maxi-

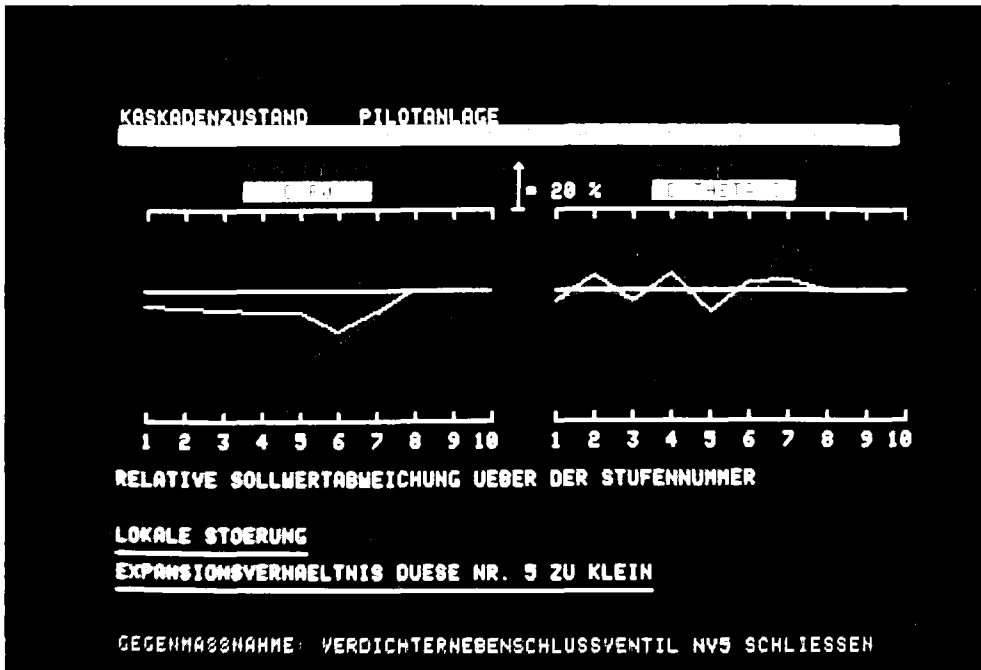


Abb. 12a: Bildschirmfoto der Sollwertabweichungen und des Diagnoseergebnisses einer Verdichterstörung, dargestellt mit dem Farbgraphik-Video-Display-System FVDS.

Versuchsauswertung Pilotanlage

Versuchsgegenstand:

Verdichterstoerung in Stufe 5 durch Verdrehen von NV 5

Maximale Abweichungen

Stufennummer/ Groesse der Stoerung (%)

NO	5 / -20.55
PO	6 / -11.79
theta U	7 / 15.22
theta Z	5 / -6.31

Mittlere Abweichungen

NO	/ -8.33
PO	/ -4.54

Stoerungsdiagnose:

lokale Expansionsverhaeltnisstoeerung an Duese Nr. 5 ,
da Kompressionsverhaeltnis des Verdichters Nr. 5 zu klein

Abb. 12b: Protokoll der Stoerungsdiagnose der in Abb. 12a dargestellten Verdichterstoerung.

malen Störungsauswirkung systematisch abgebaut werden. Dabei hat sich folgendes Vorgehen als zweckmäßig erwiesen, das eine gegenüber dem Diagnoseablauf unterschiedliche Reihenfolge der Maßnahmen vorsieht, aber natürlich die gleichen Entscheidungskriterien benutzt:

- 1.) Als erstes kann aus Größe und Vorzeichen der Mittelwerte der Sollwertabweichungen $\overline{\Delta N}_0$ und $\overline{\Delta P}_0$ entschieden werden, ob durch eine Veränderung des Zusatzgastransportes (wenn $\overline{\Delta N}_0 \cdot \overline{\Delta P}_0 < 0$ ist) eine kollektive Verbesserung des Kaskadenzustandes bewirkt werden kann oder ob eine überwiegend systematische Verstellung der Rückstauventile ausgeregelt werden muß, wenn $\Delta N_0 \cdot \Delta P_0 > 0$ ist.
- 2.) Bei Kaskadenabschnitten, die eine UF_6 -Abscheidungsanlage besitzen, erfolgt die Kontrolle und Nachregelung der UF_6 -Rückspeisestromstärke anhand der Sollwertabweichungen $\hat{\Delta N}_0$ und $\hat{\Delta P}_0$ in den der Abscheidungsanlage nächstgelegenen Stufen.
- 3.) Die Reihenfolge der Einregelungsmaßnahmen in den einzelnen Stufen orientiert sich zunächst an der Lage der maximalen Konzentrationsabweichungen $\hat{\Delta N}_0$ *).

Besitzt die Druckabweichung ΔP_0 ($S(\hat{\Delta N}_0)$) in dieser Stufe das gleiche Vorzeichen, so kann eine Rückstau- störung vermutet werden, deren Lage durch die Abweichung des UF_6 -Abschälverhältnisses in der Stufe $S_1 = S(\hat{\Delta N}_0) + 1$ oder $S_2 = S(\hat{\Delta N}_0) + 2$ bestätigt wird, in der $\hat{\Delta N}_0 \cdot \Delta J_U(S_{1,2}) < 0$ ist. In diesem Fall wird die Rückstaukorrektur in der betreffenden Stufe vorgenommen.

*) Die hier für die Pilot-Anlage angegebenen Stufenabstände und Vorzeichenkriterien können für jede andere Kaskadenschaltung und andere Werte des Stabilitätsparameters nach Abschnitt 2. sinngemäß eingesetzt werden

Hat die Druckabweichung ΔP_o ($S(\Delta \hat{N}_o)$) entgegengesetztes Vorzeichen zu $\Delta \hat{N}_o$, so wird das obige Vorgehen auf $\Delta \hat{P}_o$ angewendet und bei Vorzeichengleichheit von $\Delta \hat{P}_o$ und ΔN_o ($S(\Delta \hat{P}_o)$) das Vorliegen einer Rückstaustörung in den Stufen $S_1 = S(\Delta \hat{P}_o) + 1$, $S_2 = S_1 + 1$ wie oben überprüft.

Dieses Vorgehen führt bei der Pilot-Anlage auch bei Fehleinstellung der Verdichter-Kompression bereits sehr nahe an den optimalen Einregelungszustand heran. In technischen Anlagen mit geringer Komponentenstreuung und festliegenden Kompressionswerten der Verdichter besteht hier als weitere Maßnahme lediglich eine Optimierung der Verteilung der Sollwertabweichungen im allgemeinen mit dem Ziel einer Minimierung der Trennarbeitskosten.

- 4.) Bei der Einregelung der Pilot-Anlage wurde das Ausregeln der verbleibenden Restabweichung am sichersten durch Korrektur des Kompressionsverhältnisses des Verdichters oberhalb der Stufe mit der maximalen Abweichung $\Delta \hat{v}_z$ des Zusatzgas-Abschälverhältnisses erreicht. Dadurch wird allerdings eine sekundäre Rückstaustörung erzeugt, die im nächsten Schritt beseitigt wird, wenn ihre Auswirkungen einen Eingriff nach Pkt. 3.) erfordern. Anderenfalls wird die Einregelung der Zusatzgasabschälverhältnisse fortgesetzt.

Diese vom Rechner geführte Einregelungsprozedur wurde an der 10-stufigen Pilot-Anlage in mehreren Varianten erprobt. Dazu wurden deren 22 Stellglieder aus dem Sollbetriebszustand willkürlich in einen definierten Störungszustand verstellt, der etwa statistische Störungsverteilung erwarten ließ. Als Eingriffsmöglichkeit sind hier

die 10 Rückstauventile der Trenndüsen, die 10 Nebenschlußventile der Stufenverdichter und die beiden Regler für die Uran-Rückspeisung U_R aus der UF_6 -Abscheidungsanlage und für den Zusatzgasrückspeisestrom Z_R vorhanden.

Als besonders wirkungsvoll und einfach hat sich die Durchführung der Prozedur nach dem Schema eines "Halbschrittverfahrens" erwiesen. Hierbei wurde vom Rechner für jeden Einregelungsschritt eine vorbestimmte Schrittweite des betreffenden Stellgliedes vorgeschlagen, die bei Umkehr der Eingriffsrichtung jeweils halbiert wurde. Bei Befolgung der Rechneranweisungen durch das Bedienungspersonal waren keine überflüssigen Ventilbetätigungen zu verzeichnen und das Verfahren konvergierte rasch in einen durch die Reproduzierbarkeit der Meßgeräte begrenzten Einregelungszustand.

Da die Einregelungsmethode nach dem Prinzip der Verringerung der maximalen Sollwertabweichungen arbeitet, nähert sich der Kaskadenzustand dem Sollzustand asymptotisch. Abb. 13 zeigt den Verlauf von $|\overline{\Delta N}|$, $|\overline{\Delta J}|$ für einen Einregelungsversuch, bei dem die asymptotische Annäherung dieser beiden Betriebsgrößen an den Sollzustand gut zu erkennen ist.

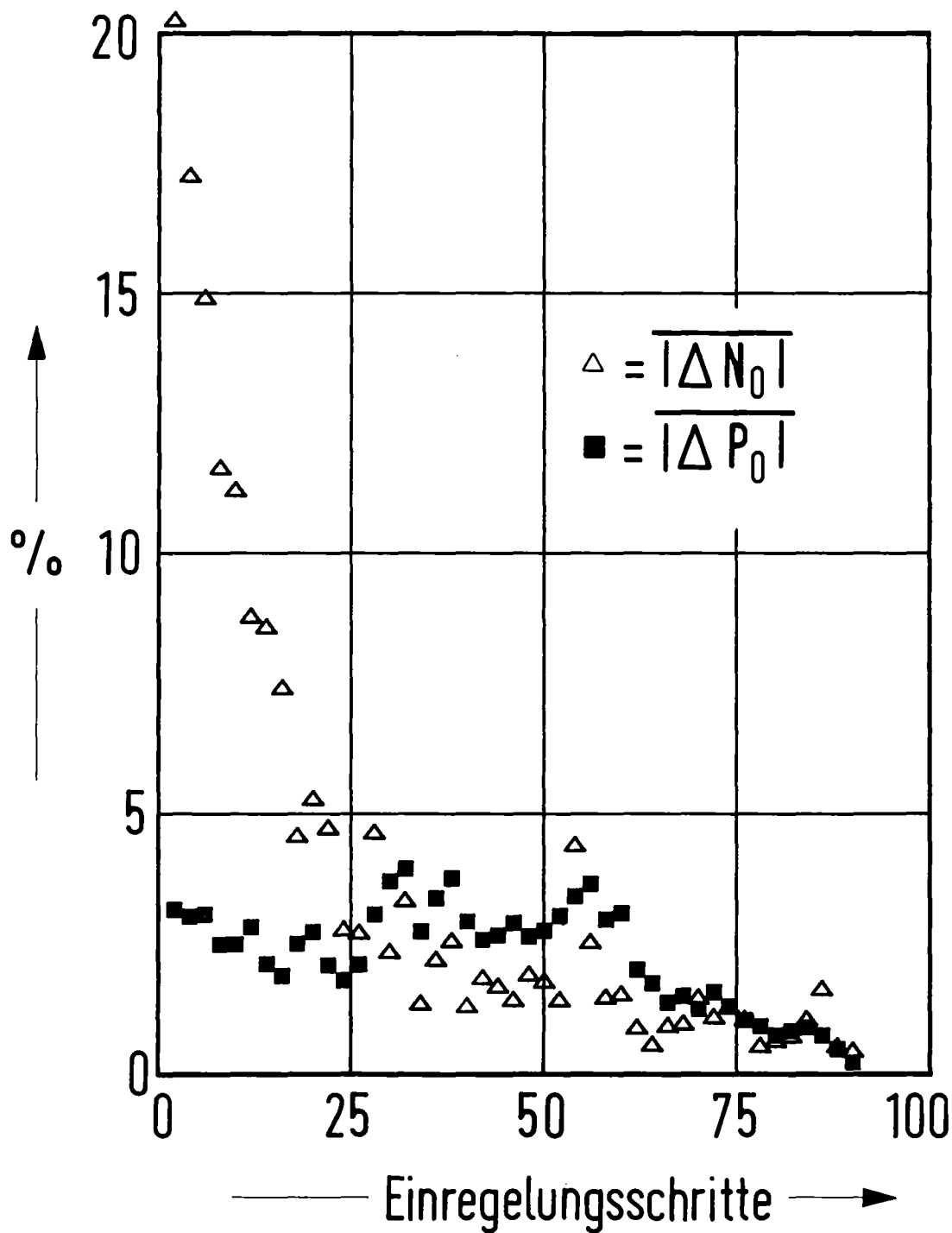


Abb. 13: Die Mittelwerte der Abweichungsbeträge $\overline{|\Delta N|}$, $\overline{|\Delta \mathcal{J}_U|}$ für einen Einregelungsversuch, bei dem die Einregelungsmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der Verringerung der maximalen Sollwertabweichungen vom Rechner vorausberechnet wurden. In dieser Darstellung sind die Abweichungen auf den erreichten Endzustand bezogen. Die gegenüber dem angestrebten Sollzustand tatsächlich verbliebenen Restabweichungen waren: $\overline{|\Delta N_0|} = 0.5 \%$, $\overline{|\Delta P_0|} = 0.4 \%$, $\overline{|\Delta \mathcal{J}_U|} = 0.5 \%$, $\overline{|\Delta \mathcal{J}_Z|} = 1.0 \%$. Der Sprung bei den Abweichungen nach 51 Einregelungsschritten erklärt sich aus einer Unterbrechung des Versuchs, der am nächsten Tag fortgesetzt wurde. Das Zeitintervall zwischen den einzelnen Einregelungsschritten betrug 5 Minuten.

4. Diskussion der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Störungsdiagnose in Trenndüsenkaskaden basiert auf typischen Verfahrenseigenschaften, die durch die von den Betriebsbedingungen abhängige Gemischtrennung von UF_6 und Zusatzgas in den Trenndüsen und durch den Einfluß unterschiedlicher Gaszusammensetzungen auf das Arbeiten der Verfahrensverdichter bedingt sind. Der systematische Gang der Störungsdiagnose erlaubt die Fehlerkennung unter Benutzung logischer Verknüpfungen zwischen den Maximalwerten und den Mittelwerten der beobachteten Sollwertabweichungen.

Naturgemäß konnte nur ein begrenztes Spektrum von Störungsursachen untersucht werden. Die Tatsache, daß für alle betrachteten Fälle redundante Merkmale ermittelt werden konnten, spricht dafür, daß die Methode für weitere, hier nicht untersuchte Störfälle ausbaufähig ist. Tritt in einer Kaskade ein Fehler auf, der bei der Programmierung des Diagnoseablaufs entweder in Ursache und Auswirkung unbekannt oder noch nicht untersucht worden war, so liegt im gespeicherten Datensatz des Überwachungssystems ein nachträglich analysierbares "Störungsprofil" vor, mit dessen charakteristischen Merkmalen ein Diagnoseweg für die bisher unbekannte Störung gefunden werden dürfte.

Eine weitere Erleichterung der Betriebsführung von Trenndüsenkaskaden ergibt sich aus der Kombination der Speichermöglichkeiten des Rechnersystems und der Anwendung der Diagnosemethodik für die Einregelung der Kaskade. So kann jeder in der Kaskade einmal realisierte und gespeicherte Betriebszustand unter Rechneranweisung in kurzer Zeit reproduziert werden, indem der zugehörige Datensatz

als Bezugsbasis für das Diagnoseverfahren und die Einregelungsprozedur benutzt wird. Damit kann ein sicherer und rascher Übergang zwischen unterschiedlichen Betriebszuständen der Kaskade durchgeführt werden.

Der größte Teil des Datenverarbeitungsaufwandes entfällt bei der Kaskadenüberwachung auf die Berechnung der Abschälverhältnisse über die Kaskadenbilanzierung und die Durchsatzberechnung der Trenndüsen. Hierfür war bei der 10-stufigen Pilot-Anlage unter Benutzung der Kleinrechners WANG 2200 VP ein Speicherplatz von 20 kByte und eine Rechenzeit von ca. 2 sec. erforderlich. Der Zeitaufwand für das Diagnose-Programm lag demgegenüber unter einer zehntel Sekunde. Für diesen Programmteil wird sich wegen der festliegenden und begrenzten Anzahl der durchzuführenden logischen Operationen auch bei Kaskadenabschnitten mit größenordnungsmäßig hundert Stufen weder der Speicherbedarf wesentlich erhöhen noch wird der Zeitaufwand hierfür über eine Sekunde Rechenzeit ansteigen. Für das Überwachungsprogramm dagegen ist der Daten-Speicherbedarf etwa proportional zur Stufenzahl in der Kaskade, so daß eine Kaskade mit insgesamt 500 Stufen in 4 getrennt behandelten Abschnitten einen Benutzerspeicher von etwa 64 kByte erfordert. Diese Anforderungen sind heute von einer Reihe von Kleinrechner-Systemen erfüllbar und zugleich kann mit einem Zeitbedarf von weniger als 1 Minute für die Überwachung einschließlich der Störungsdiagnose in einer Kaskade mit ca. 500 Stufen gerechnet werden.

Die in dieser Arbeit aufgezeigte Methode der Störungsdiagnose wird Bestandteil der Kaskadenüberwachung. Das Gesamtsystem liefert dem Operateur den Überblick über den aktuellen Betriebszustand der Kaskade und unterstützt ihn durch rasche Fehlererkennung bei der Beurteilung ungewöhn-

licher Betriebszustände und bei der Entscheidungsfindung in Störfällen.

Sie ermöglicht ihm eine gezielte Einregelung der Kaskade in einen gewünschten Sollzustand. Dieser stimmt bei Streuung der Komponenteneigenschaften nur begrenzt mit den Auslegungswerten der Betriebsgrößen überein. So wurde in der mit erheblichen Exemplarstreuungen der Trenndüsen und der Rootsverdichter behafteten Pilot-Anlage ein Sollzustand eingeregelt, bei dem gleiche Uranstufendurchsätze $U_0 = \text{konst.}$ der Trenndüsen durch individuelle Sollwertvorgabe für die Ausgangsdrucke $P_0(s)$ eingestellt wurden. Dabei konnten praktisch identische Werte für den UF_6 -Molenbruch $N_0 = N_0^+$ erreicht werden, nicht jedoch für die Expansionsverhältnisse der Düsen.

Die zweckmäßige Auswahl des im Hinblick auf eine optimale Nutzung der Trennleistung der Kaskade günstigen konsistenten Satz von Betriebsbedingungen der individuellen Trennstufen würde für den Kaskadenbetreiber eine wichtige Ergänzung des vorliegenden Überwachungskonzeptes bedeuten, die in einer weiteren Untersuchung erarbeitet werden sollte.

Wir danken Herrn Prof. Dr. E. W. Becker für sein Interesse an dieser Arbeit. Zahlreiche Mitarbeiter des Institutes, insbesondere Herr Dr. W. Fritz haben durch wertvolle Diskussionen zu dieser Arbeit beigetragen. Den Herren J. Dröge und A. Mayer gilt der Dank für die Durchführung der Versuche, den Herren W. Baam und H. Kumm für die Zusammenstellung und Betreuung der Elektronik.

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. Chemie Intern. Edition 6 (1967) S. 508. Diese Arbeit enthält eine Zusammenstellung der früheren Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren.
- /2/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld und G. Eisenbeiß: Die physikalischen Grundlagen der Uran²³⁵-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren. Die Wirkung des leichten Zusatzgases. Z. Naturforsch. 26a (1971) S. 1377-1384.
- /3/ E.W. Becker, W. Bier, G. Frey, R. Schütte: Trenndüsen-Demonstrationsanlage für die Urananreicherung. Atomwirtschaft/Atomtechnik 14 (1969), S. 249.
- /4/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte, D. Seidel: Uranium Enrichment by the Separation Nozzle Process. Naturwissenschaften 63 (1976), p. 407.
- /5/ E.W. Becker, W. Bier, D. Seidel, U. Sieber, K. Schubert, R. Schütte: Technological Aspects of the Separation Nozzle Process "Developments in Uranium Enrichment". AIChE-Symposium Series 169, Vol. 73 (1977).
- /6/ H.J. Fritsch, R. Schütte: Trennung von UF₆ und Zusatzgas bei Trenndüsenanlagen mit einer Kombination von Vorabscheidungstrenndüse und Tieftemperaturabscheidung. KFK 1437 (1971).
- /7/ J. Schmid, R. Schütte: Experimentelle Untersuchungen der Tieftemperatur-Desublimation von Uranhexafluorid aus Gemischen mit Wasserstoff in Gegenstrom-Kompaktwärmetauschern. KFK 2428 (1977).
- /8/ R. Schütte, D. Seidel, W. Fritz, D. Plesch, G. Linder, H.J. Fritsch: Experimentelle und theoretische Untersuchungen des stationären Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden für die U-235-Anreicherung. Chemie-Ing. Technik 44 (1972) S. 1099.
- /9/ H. Hein, R. Schütte, H. Steinhaus: Entwicklung und Erprobung rechnerunterstützter Inbetriebnahme-Prozeduren für Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung. KFK 2651 (1978)

- /10/ W. Fritz, R. Schäfer, R. Schütte: Auswirkungen und Gegenmaßnahmen beim Ausfall eines Stufenverdichters in einer Trenndüsenkaskade zur Uran-235-Anreicherung. KFK 2142 (1975).

- /11/ G. Linder, R. Schütte: Experimentelle Untersuchungen des Stabilitätsverhaltens einer 10-stufigen Trenndüsenkaskade bei periodischen Störungen der Betriebsbedingungen. KFK 1647 (1972).

- /12/ W. Fritz, P. Hoch, G. Linder, R. Schütte: Experimentelle Untersuchungen und Digitalrechnersimulation des instationären Betriebsverhaltens von Trenndüsen-Kaskaden für die U-235-Anreicherung. Chemie-Ing.-Technik 45 (1973) S. 470.

- /13/ W. Fritz: Berechnung des stationären Betriebsverhaltens einer zehnstufigen Trenndüsenkaskade. Dissertation Universität Karlsruhe (1970).

- /14/ R. Schütte: Das gasdynamische Betriebsverhalten und die Kriterien der inhärenten Stabilität von Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung. KFK 1986 (1974).

Nomenklaturverzeichnis

F	Uraneinspeisestromstärke (<u>F</u> eed)
I	Inventar einer Trennstufe
I _U	Uraninventar
I _Z	Zusatzgasinventar
L _O	Molstromstärke durch eine Trenndüse (Ausgangsgas)
L _l	Molstromstärke in der <u>leichten</u> Fraktion
L _s	Molstromstärke in der <u>schweren</u> Fraktion
N _{O,1,s}	UF ₆ -Konzentration im Verfahrensgas (bzw. UF ₆ -Molenbruch)
ΔN _O	Relative Sollwertabweichung der UF ₆ -Konzentration $\Delta N_O = (N_O - N_O^+) / N_O^+$
P	Produktstromstärke (<u>P</u> rudent)
P _{O,1,s}	Druck des Verfahrensgases
U _{O,1,s}	Uranstromstärke
W	Abfallstromstärke (<u>W</u> aste, heute: Tails)
Z _{O,1,s}	Zusatzgasstromstärke
J	Gesamtabschälverhältnis
J _U	Uranabschälverhältnis
J _U [*]	Nominelles, durch die Schaltung der Kaskade bedingtes Uranabschälverhältnis
J _Z	Zusatzgasabschälverhältnis
θ	Verweilzeit
σ _U	Stabilitätsparameter für das Uraninventar
σ _Z	Stabilitätsparameter für das Zusatzgasinventar
τ _U	Urantransport
τ _Z	Zusatzgastransport
+	Kennzeichnung des Sollwertes
^	Maximalwert
-	Mittelwert
	Betrag