

KfK 2651
September 1978

Entwicklung und Erprobung rechnerunterstützter Inbetriebnahme-Prozeduren für Trenndüsen-Kaskaden zur U-235-Anreicherung

H. Hein, 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 2651

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG RECHNERUNTERSTÜTZTER
INBETRIEBNAHME - PROZEDUREN FÜR TRENNDÜSEN -
KASKADEN ZUR U-235-ANREICHERUNG

H. Hein +)
R. Schütte
H. Steinhaus

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

+) Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (T.H.)
(1976)

Zusammenfassung

In einer industriellen Trenndüsenkaskade werden die Meßwerterfassung und die verfahrenstechnische Überwachung mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitung im on-line-Betrieb erfolgen. Zur Entwicklung der hierzu erforderlichen Meß- und Überwachungstechniken wurde die Überwachung der 10-stufigen Pilot-Anlage mit Hilfe des Kleinrechnersystems WANG 2200 erstmalig im on-line-Betrieb erprobt.

Mit Hilfe der Datenverarbeitung wird zugleich eine Reduktion des Meßaufwandes erzielt, da eine große Zahl nicht unmittelbar meßbarer Betriebswerte aus einer reduzierten Anzahl von Messungen erhalten werden kann, indem man sie unter Ausnutzung der Materialbilanzen im gasdynamischen Netzwert der Anreicherungskaskade berechnet. Dies erfolgt mit einem "Kaskadenüberwachungsprogramm" im on-line-Betrieb, das durch graphische Darstellung der Abweichungen der wesentlichen Betriebsgrößen von ihren Sollbetriebswerten dem Kaskaden-Operator einen verbesserten Überblick über den aktuellen Kaskadenzustand vermittelt und ihm das Erkennen von Störungsursachen erleichtert. Die hierfür gewählte graphische Darstellungsweise und ihre betriebstechnische Leistungsfähigkeit wird am Gang einer Kaskadeneinregelung und an ausgewählten Beispielen gestörter Kaskadenzustände erläutert.

Die Berechnung der abgeleiteten Größen in allen Stufen aus den Meßwerten Druck p_0 und Konzentration N_0 erfordert die Kenntnis der individuellen Durchfluß-Kennlinien der Trenndüsen. Die Verdichter-Kennlinien werden ebenfalls ermittelt. Da der Überwachungsrechner bei der Berechnung des Kaskadenzustandes im laufenden Anreicherungsbetrieb auf diese Komponentendaten zurückgreifen muß, werden ihm die routinemäßige Aufnahme und Darstellung beider Kennlinien übertragen (Inbetriebnahme-Prozeduren).

DEVELOPMENT AND TESTING OF COMPUTER AIDED START-UP
PROCEDURES FOR U-235 ENRICHMENT SEPARATION NOZZLE CASCADES

Abstract

In industrial scale separation nozzle cascades measured data acquisition and process control will be performed by on-line computer systems. To develop the necessary measurement and monitoring techniques, on-line control of the ten stage pilot plant by the WANG 2200 miniature computer system was tested.

On-line data processing at the same time has reduced the number of measurements because a large number of operating data which cannot be measured directly can be obtained from a reduced number of measurements by calculation from the material balances in the gas dynamics network of the enrichment cascade. This is performed on-line by means of a cascade monitoring code which produces diagrams of the deviations of major operating parameters from their set values and thus offers to cascade operators an improved picture of the present status of a cascade, thereby facilitating the detection of causes of defects. The graphic representation chosen for this purpose and the performance of the system in practical operation is explained by an example of cascade adjustment and by a few selected examples of cascade fault conditions.

Calculation of the quantities derived at all stages from the pressure (p) and concentration (N) readings requires that the individual flow characteristics of the separation nozzles are known. Also the compressor characteristics have to be determined. Since the monitoring computer in calculating the cascade status utilizes these component characteristics in current enrichment operation, routinely establishing and plotting these two characteristics is also attributed to the computer system (start-up procedures).

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Aufgabenstellung und Zusammenfassung	2
2. Die Versuchskaskade	4
2.1 Anlagenbeschreibung	6
2.2 Die Meßwertverarbeitung	6
3. Die Berechnung des stationären Betriebszustandes	10
4. Die Inbetriebnahme-Prozeduren	14
4.1 Die Ermittlung der Durchflußkennlinien der Trenndüsen	14
4.2 Die Ermittlung der Verdichter-Kennlinien	20
5. Die rechnerunterstützte Kaskadenüberwachung	22
5.1 Die Kaskaden-Betriebs-Prozedur	22
5.2 Kaskadeneinregelung mit Hilfe der Betriebs-Prozedur	25
5.3 Erfassung typischer Störungsauswirkungen	26
Literaturverzeichnis	29

1. Aufgabenstellung und Zusammenfassung

Für den optimalen Produktionsbetrieb einer Trenndüsen-Kaskade müssen die einzelnen Trennstufen unter ihren optimalen Betriebsbedingungen arbeiten. Diese sind festgelegt durch den vorgesehenen Düsenvordruck p_o^+ , den richtigen Molenbruch N_o^+ des UF_6 im Verfahrensgas und das optimale Expansionsverhältnis p_o^+/p_M^+ . Zusätzlich müssen für die optimale Ausnutzung der Trennleistung aller Stufen in der Zusammenschaltung zu einer Rechteck-Kaskade, diese mit dem gleichen Durchsatz L_o^+ und dem für die Kaskadenschaltung optimalen Wert des Uranabschälverhältnisses \mathcal{S}_U^+ betrieben werden.

Die Überwachung und Einhaltung dieses Sollzustandes, sowie die daraus folgende Notwendigkeit, auftretende Abweichungen und ihre Ursachen zu erkennen, setzt im Prinzip die ständige Kenntnis aller genannten Betriebsgrößen voraus. Wegen des erheblichen meßtechnischen Aufwands, der bei vollständiger Messung dieser Größen entstünde und da besonders die Abschälverhältnisse nicht direkt meßbar sind, wird zur Bestimmung dieser Betriebsgrößen eine Methode verfolgt, bei der in allen Stufen der Kaskade nur die Düsenvordrucke p_o und die UF_6 -Konzentrationen N_o gemessen werden.

Werden in einer Kaskade mit $\mathcal{S}_U^+ = 1/2$ zusätzlich die UF_6 -Molenbrüche N_M und N_K in der leichten bzw. in der schweren Fraktion der Kopfstufe gemessen, so können im Prinzip mit Hilfe der dann in dieser Stufe berechenbaren Abschälverhältnisse und den über N_o und p_o indirekt bestimmbareren Stufendurchsätzen L_o die Abschälverhältnisse \mathcal{S} in allen Stufen der Kaskade berechnet werden. Mit dieser Methode wird eine Minimalisierung des meßtechnischen Aufwandes durch Berechnung abgeleiteter Größen erreicht /1/.

In einer industriellen Kaskade muß die meßtechnische Erfassung und verfahrenstechnische Überwachung mit Hilfe elektronischer Datenverarbeitung im on-line-Betrieb gelöst werden /2/. Zur Entwicklung der hierzu erforderlichen Meß- und Überwachungstechniken wird im Institut für Kernverfahrenstechnik die Überwachung einer 10-stufigen Trenndüsenkaskade, der sogenannten Pilot-Anlage, mit Hilfe des Kleinrechnersystems WANG 2200 /3/ im on-line-Betrieb erprobt.

Die Berechnung der abgeleiteten Größen L_0 und S in allen Stufen aus den Meßwerten Druck p_0 und Konzentration N_0 erfordert die Kenntnis der individuellen Durchfluß-Kennlinien der Trenndüsen. Zur Durchführung einer späteren Diagnose von Störungsursachen sollen die Verdichter-Kennlinien ebenfalls ermittelt werden. Da der Überwachungsrechner bei der Berechnung des Kaskadenzustandes im laufenden Anreicherungsbetrieb auf diese Komponentendaten zurückgreifen muß, werden ihm auch die routinemäßige Aufnahme und Darstellung dieser beiden Kennlinien übertragen. Die hierfür erforderlichen Messungen werden üblicherweise bei der Inbetriebnahme der Komponenten vorgenommen und dienen gleichzeitig als Test für die Endabnahme. Sie werden deshalb in dieser Arbeit als "Inbetriebnahme-Prozeduren" bezeichnet. Diese Prozeduren "Ermittlung der Durchflußkennlinien" und "Ermittlung der Verdichter-Kennlinien" werden für die Pilot-Anlage erarbeitet und anhand von Beispielen dargestellt.

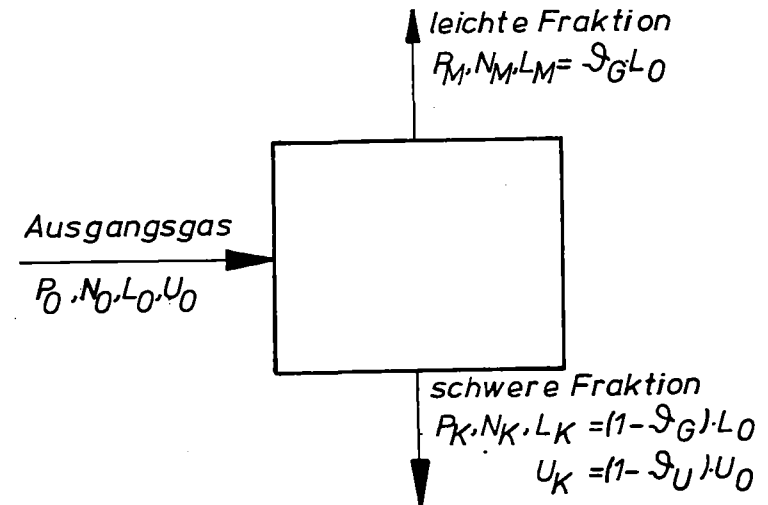
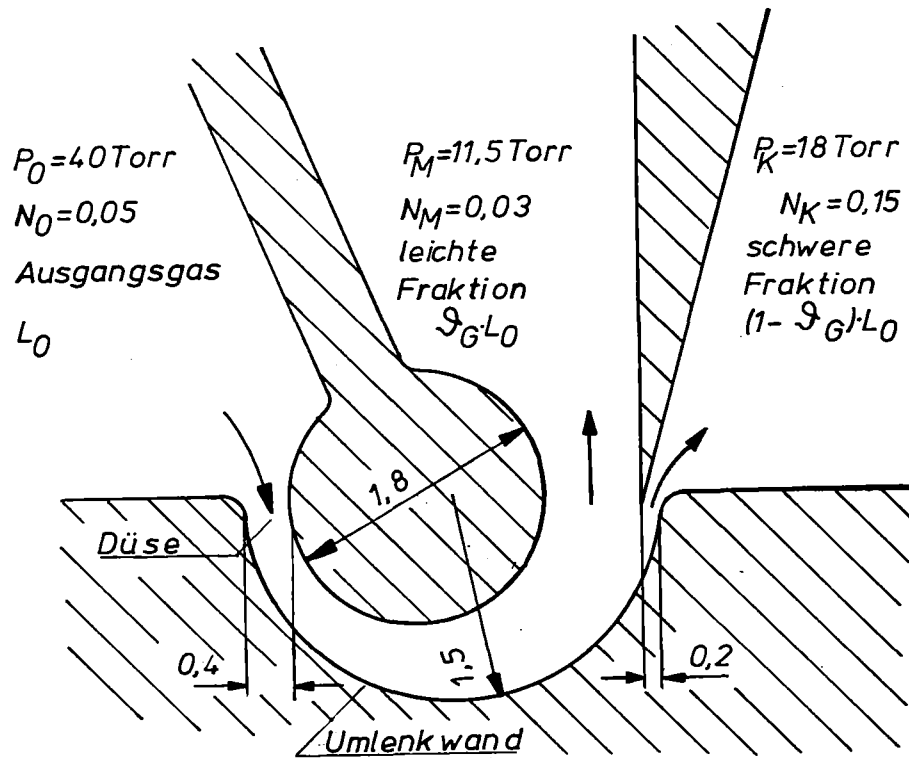
Die mit den Inbetriebnahme-Prozeduren ermittelten Komponentenwerte werden zum Teil für die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Berechnungsprozedur benötigt, mit der die nicht direkt gemessenen Betriebsgrößen (z. B. Durchfluß und Abschälverhältnisse) berechnet werden. In Verbindung mit geeigneten Darstellungsarten des ermittelten Kaskadenzustandes werden diese Berechnungen in einem "Kaskadenüberwachungs-Programm" zusammengefaßt. Die im on-line-Betrieb durchge-

fürten Berechnungen liefern durch die graphische Darstellung der Abweichungen der Betriebsgrößen Druck, UF_6 -Konzentration und der Abschälverhältnisse von ihren Sollbetriebswerten, dem Kaskaden-Operator einen verbesserten Überblick über den aktuellen Kaskadenzustand und erleichtern ihm das Erkennen von Störungsursachen. Die hierfür gewählte graphische Darstellungsweise und ihre betriebstechnische Leistungsfähigkeit wird am Gang einer Kaskadeneinregelung und an ausgewählten Beispielen gestörter Kaskadenzustände erläutert. Mit Hilfe dieses "Kaskadenüberwachungs-Programmes" konnte die Einregelungszeit der Pilot-Anlage von bisher einer Woche auf ca. 4 Stunden reduziert werden.

Damit liegt in einer ersten Entwicklungsstufe für Kaskaden mit $\mathcal{S}_U = 1/2$ eine rechnerunterstützte Kaskadenbetriebs-
Prozedur vor, die als Software-Grundlage für den on-line-Verbundbetrieb der sogenannten Gruppenrechner der Überwachung von Kaskaden mit komplizierteren Schaltungen dienen kann.

2. Die Versuchskaskade

Das am Institut für Kernverfahrenstechnik entwickelte Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von U-235 ist ein gasdynamisches Trennverfahren. Es benutzt die teilweise räumliche Entmischung unterschiedlich schwerer Komponenten unter der Wirkung von Zentrifugalkräften in einer gekrümmten schnellen Gasströmung /4/ (Abb. 1). In der für experimentelle Untersuchungen gebauten Pilot-Anlage wird als Verfahrensgas ein Gemisch von 5 Mol-% UF_6 und 95 Mol-% Helium benutzt /5/. Das Verfahrensgas tritt mit der molaren Stromstärke L_0 und der molaren UF_6 -Konzentration N_0 unter dem Vordruck p_0 in die Trenndüse ein, in der das auf den Druck p_M expandierte Gas durch einen Abschäler in eine leichte Fraktion und eine schwere Fraktion aufgeteilt wird. Der Grad der Aufteilung wird durch die Stellung des Abschälers und den Gegendruck p_K



Querschnitt einer Trenndüse mit den Sollbetriebsbedingungen der Pilot-Anlage.

Ersatzschaltbild der Trenndüsen.

Abb. 1: p = Absolutdrücke; N = UF_6 -Molenbrüche im Helium/ UF_6 -Gemisch; L = Gemischstromstärken; U = UF_6 -Stromstärken; \mathcal{S}_G = Gesamtabschälverhältnis; \mathcal{S}_U = UF_6 -Abschälverhältnis; \mathcal{S}_Z = Helium-Abschälverhältnis. Die Indizes 0, M, K kennzeichnen die Betriebsgrößen im Ausgangsgas und in der leichten bzw. schweren Fraktion; Maße in mm.

in der schweren Fraktion bestimmt. Man definiert die Abschälverhältnisse \mathcal{S} als Verhältnis der Ströme in der leichten Fraktion zu den entsprechenden Strömen im Ausgangsgas (vgl. Abb. 1).

2.1 Anlagenbeschreibung

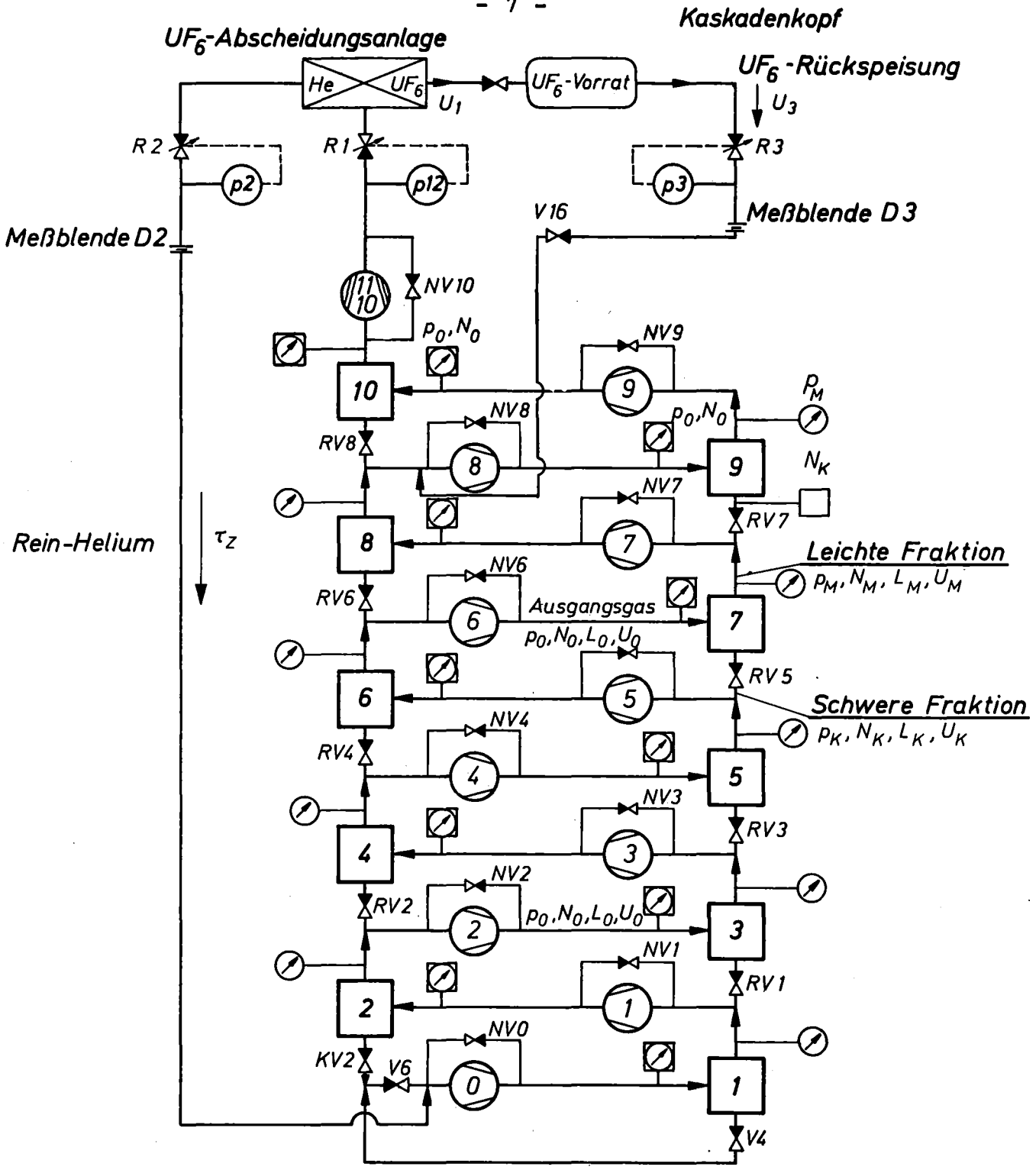
Die Versuchskaskade besteht aus zehn in Reihe geschalteten Trenndüsenstufen. Die Abb. 2 zeigt das Fließschema und die Meßstellenbestückung der aus neun identischen Stufen und aus der Stufe 10 als Vorabscheidungsstufe /6/ aufgebauten Pilot-Anlage /1/.

Die Zusammenschaltung der aus Trenndüse und Verdichter bestehenden Stufen mit dem nominellen Uranabschälverhältnis $\mathcal{S}_{U,nom} = 1/2$ erfolgt so, daß die leichte Fraktion einer Trenndüse über den zu dieser Stufe gehörenden Verdichter der folgenden Stufe zugeführt wird, während dieser Verdichter gleichzeitig die schwere Fraktion der übernächsten Stufe ansaugt.

In der Trenndüsenkaskade entsteht infolge der Gemischtrennung zwischen Helium und UF_6 ein kaskadenaufwärts gerichteter Nettostrom an leichtem Zusatzgas τ_2 , der am Kaskadenkopf mit Hilfe der UF_6 -Abscheidungsanlage entnommen und zum Kaskadenfuß zurückgeführt wird. Der dabei aus der leichten Fraktion der Vorabscheidungsstufe 10 abgeschiedene UF_6 -Anteil wird aus einem UF_6 -Vorrat ersetzt und in die leichte Fraktion der Stufe 8 zurückgespeist. Zusammen mit der schweren Fraktion der Stufe 10 erhält man somit die vorgesehenen Stromstärken für das Ausgangsgas der Stufe 9.

2.2 Die Meßwertverarbeitung

In der Pilot-Anlage werden für die Messung der Drucke elektrische Druckaufnehmer und für die Messung der UF_6 -Konzentrationen im Institut für Kernverfahrenstechnik entwickelte



Meßgröße	Symbol
Druck	
Druck und Konzentration	
Konzentration	

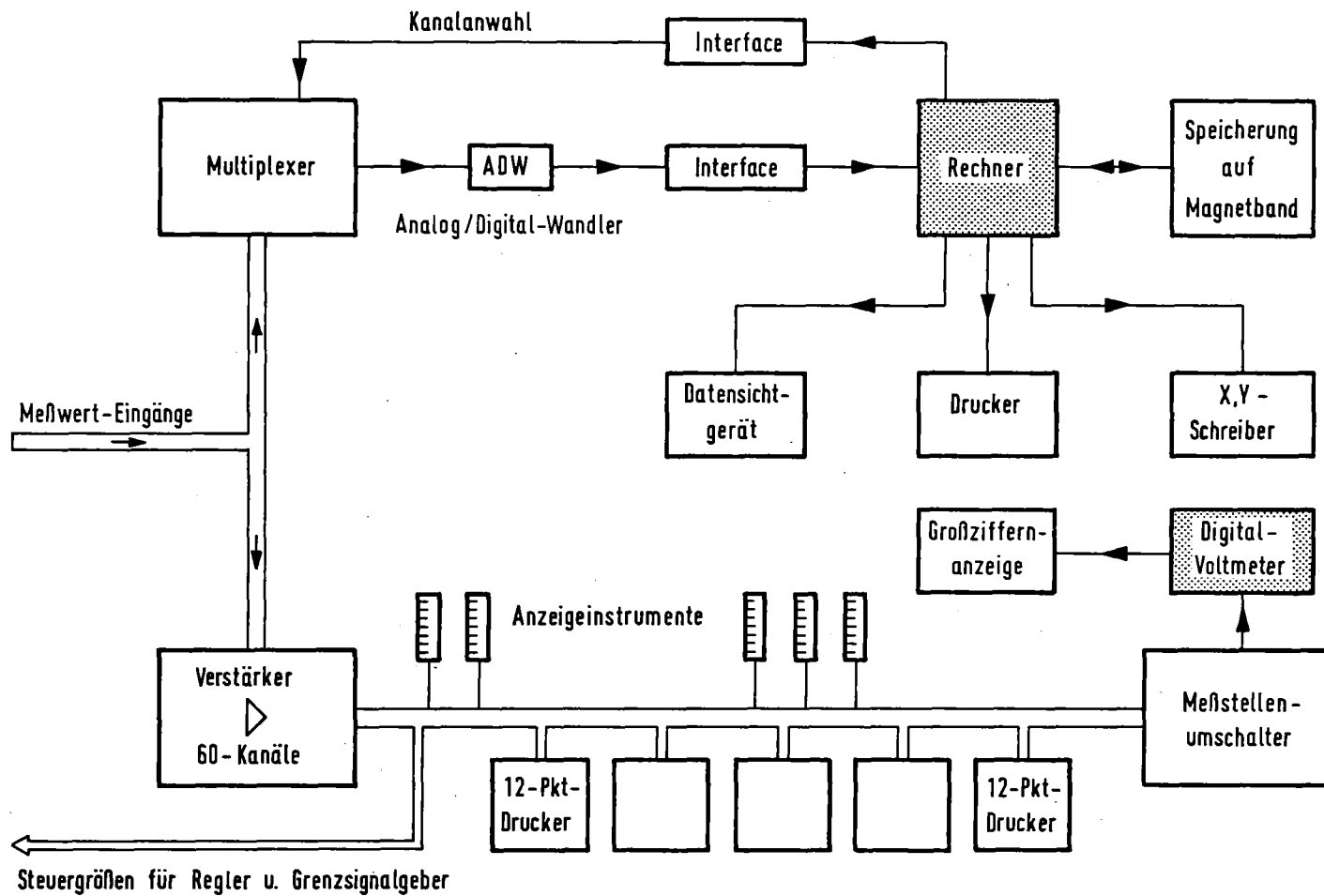
Kaskadenfuß

Abb. 2: Fließschema der Pilot-Anlage mit eingezeichneter Meßstellen-Bestückung. Die Kaskade besitzt neun identische Trenndüsen, Düse 10 dient als Vorabscheidungs-Trenndüse für die Tieftemperatur-Abscheidung des UF_6 , der an den Kaskadenfuß zurückgeführt wird.

Wärmeleitzellen benutzt /7/. Es werden in jeder Stufe der Düsenvordruck p_0 , der Druck in der leichten Fraktion p_M und die UF_6 -Konzentration N_0 im Ausgangsgas gemessen. Zusätzlich wird in der Stufe 9 die Konzentration N_K in der schweren Fraktion gemessen. Die Stromstärkemessung des Helium-Rückspeisestromes τ_z und des UF_6 -Einspeisestromes U_3 erfolgt durch Messung der Blendenvordrucke p_2 und p_3 an den Überschallblenden D 2 und D 3.

Die Meßwertverarbeitung in der Pilot-Anlage besteht aus einem konventionellen und einem rechnerunterstützten System. Bei den Systemen werden die Analogsignale der Druck- und Konzentrationsmeßgeräte über Meßleitungen zugeführt. Im konventionellen System werden die in der Schaltwarte ankommenden Analogsignale in Gruppen zusammengefaßt auf vier Punktdruckern mit je 12 Kanälen registriert. Zusätzlich werden die Meßwerte der Druckaufnehmer auf Drehspulanzeigegegeräten analog dargestellt.

Parallel zu dem konventionellen Teil der Meßwernerfassung ist eine rechnergeführte Meßwernerfassung mit einem Kleinrechner WANG 2200 angeschlossen /8/, der die Meßwertverarbeitung für die 10-stufige Kaskade im on-line-Betrieb erlaubt. Das Blockschaltbild dieses Meßwertverarbeitungssystems ist in Abb. 3 dargestellt. Dieses System wird mit einem Meßwernerfassungsprogramm betrieben, das sämtliche am Meßstellenumschalter (Multiplexer) anliegenden Analogsignale der Druck- und Konzentrationsmeßgeräte mittels eines Digitalvoltmeters (Analog/Digital-Wandler) dem Rechner zuführt. Unter Zuordnung von Meßwert und Meßstelle wird eine Umrechnung mit den im Rechner gespeicherten Eichfaktoren (Skalierung) zu physikalischen Größen (Druck und Konzentration) vorgenommen. Die so gewonnenen Meßgrößen stehen als "Rohdaten" zur Weiterverarbeitung zur Verfügung und können jederzeit oder in gewünschten Abständen auf Magnetband gespeichert werden. Ebenso ist die Zeitspanne zwischen den einzelnen Abfragezyklen wählbar.



Meßwertverarbeitung an der Versuchsanlage

Abb. 3: Blockschaltbild der konventionellen und rechnerunterstützten Meßwertverarbeitung und Meßwertverarbeitung, wie sie in der Schaltwarte der Pilot-Anlage installiert ist. Nach /8/.

3. Die Berechnung des stationären Betriebszustandes

Für den optimalen Produktionsbetrieb einer Trenndüsenkaskade müssen die einzelnen Trennstufen unter ihren optimalen Betriebsbedingungen arbeiten. Diese sind festgelegt durch den vorgesehenen Düsenvordruck p_o^+ , den richtigen Molenbruch N_o^+ des UF_6 im Verfahrensgas und das optimale Expansionsverhältnis p_o^+/p_M^+ . Zusätzlich müssen in der Zusammenschaltung zu einer Rechteck-Kaskade alle Stufen zur optimalen Ausnutzung ihrer Trennleistung mit dem gleichen Durchsatz L_o^+ und dem für die Kaskadenschaltung optimalen Wert des Uranabschälverhältnisses \mathcal{S}_U^+ betrieben werden.

Im folgenden wird der Rechnungsgang erläutert, mit der in einer Rechteck-Kaskade mit $\mathcal{S}_U^+ = 1/2$ die nicht direkt gemessenen Betriebsgrößen Durchsatz L_o und die Abschälverhältnisse \mathcal{S} aus den gemessenen Betriebsgrößen Düsenvordruck p_o und UF_6 -Konzentration N_o berechnet werden können, wenn die Abschälverhältnisse \mathcal{S} in einer Stufe bekannt sind.

Aus der Durchflußkennlinie einer Trenndüse ergibt sich, daß der Düsendurchsatz L_o bei gegebener Temperatur und überkritischem Expansionsverhältnis p_o/p_M eine eindeutige Funktion des Düsenvordrucks p_o und der UF_6 -Konzentration N_o im Ausgangsgas ist. Sind die Betriebswerte p_o und N_o bekannt, so kann der Düsendurchsatz L_o nach dem im Abschnitt 4.1 angegebenen Zusammenhang berechnet werden.

Betrachtet man ein einzelnes Trennelement und stellt mit Hilfe der Definitionen der Abschälverhältnisse \mathcal{S} die Bilanzen der Teilströme auf (vgl. Abb. 1), so erhält man die in den folgenden Gleichungen (1), (2) und (3) angegebenen Zusammenhänge:

$$\text{Gesamt-Abschälverhältnis} \quad \mathcal{S}_G = \frac{N_O - N_K}{N_M - N_K} \quad (1)$$

$$\text{Uran-Abschälverhältnis} \quad \mathcal{S}_U = \frac{N_M}{N_O} \cdot \mathcal{S}_G \quad (2)$$

$$\text{Zusatzgas-Abschälverhältnis} \quad \mathcal{S}_Z = \frac{1 - N_M}{1 - N_O} \cdot \mathcal{S}_G \quad (3)$$

Zur Berechnung der Abschälverhältnisse der Stufen wäre im Prinzip also die Messung auch der beiden anderen UF_6 -Konzentrationen N_M und N_K in der leichten und schweren Fraktion in jeder Stufe erforderlich. Eine Betrachtung der Materialbilanzen im Fließbild einer Rechteck-Kaskade zeigt jedoch, daß sich dieser meßtechnische Aufwand (1 Druck- und 3 Konzentrationsmessungen pro Stufe) wesentlich reduzieren läßt. Befindet sich die Anlage in einem stationären Zustand und kennt man die Abschälverhältnisse \mathcal{S}_U und \mathcal{S}_Z in einer einzelnen Stufe (sogenannte " \mathcal{S} -Meßstelle"), so lassen sich nach den folgenden Überlegungen die unbekanntenen Abschälverhältnisse der übrigen Stufen berechnen. Hierzu benutzt man die in Abb. 4 eingetragenen Material-Bilanzen an geeigneten Schnittstellen der Kaskade. Erfolgt die " \mathcal{S} -Messung" in einer Stufe s (z. B. Stufe 9 der Pilot-Anlage), so sind ihre Abschälverhältnisse bekannt und bei Kenntnis des Düsendurchsatzes $L_O(s)$ ist der Betriebszustand dieser Stufe ermittelt. Durch Bilanzierung an den Knoten zwischen den Stufen $s/(s+2)$, $s/(s-2)$, $(s-2)/(s-4)$ usw. erhält man die für die Berechnung der Abschälverhältnisse in der Stufe $(s-2)$ notwendigen Teilströme U_K des UF_6 und Z_K des Zusatzgases in der betreffenden schweren Fraktion:

$$U_K(s-2) = L_O(s-1) \cdot N_O(s-1) - [1 - \mathcal{S}_U(s)] \cdot L_O(s) \cdot N_O(s) \quad (4)$$

$$Z_K(s-2) = L_O(s-1) \cdot [1 - N_O(s-1)] - [1 - \mathcal{S}_Z(s)] \cdot L_O(s) \cdot [1 - N_O(s)] \quad (5)$$

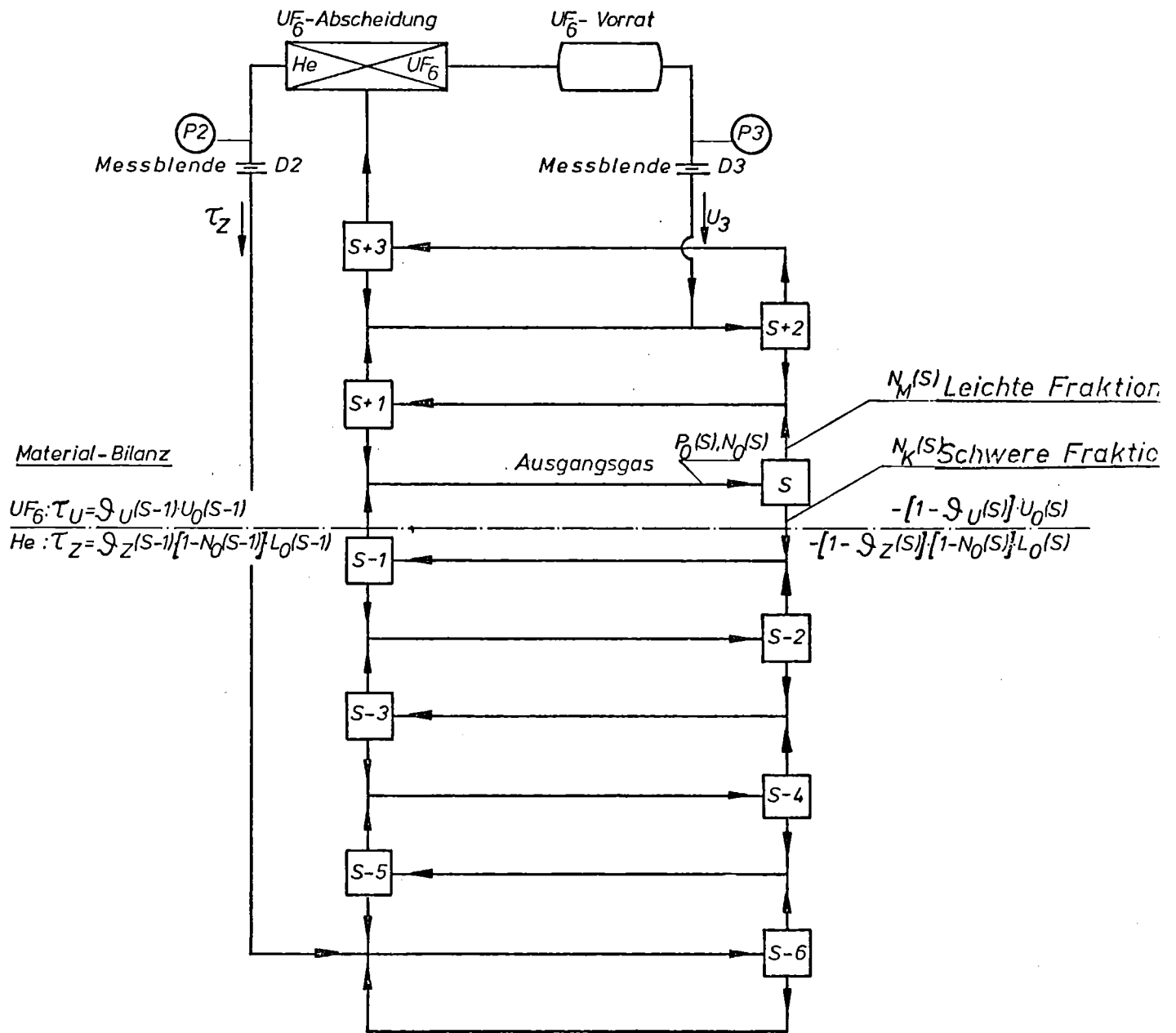


Abb.4: Fließschema der Pilotanlage mit eingetragener Material-Bilanz zur Berechnung des stationären Kaskadenzustandes

Bei Fortführung der Bilanzen an den Knoten in diesem Strang können die Abschälverhältnisse aller Stufen dieses Stranges berechnet werden, da die Durchsätze L_o der Stufen (s+1), (s-1), (s-3) usw. im anderen Strang aus den Meßwerten Druck p_o und Konzentration N_o bekannt sind.

Mit Hilfe der in Abb. 4 eingezeichneten Bilanzschnitte quer zur Kaskade ergeben sich die noch unbekanntenen Abschälverhältnisse der übrigen Stufen (s+1), (s+3), (s-1) usw., aus den Transporten τ_U und τ_Z des Urans bzw. des Zusatzgases. In einer stationär arbeitenden Kaskade sind die zum Kaskadenkopf gerichteten Transporte des Urans τ_U bzw. des Zusatzgases τ_Z (Differenz der entsprechenden auf- und abwärtsgerichteten Ströme) in allen Bilanzschnitten stets gleich groß.

$$\tau_U = \mathfrak{A}_U(s-1) \cdot L_o(s-1) \cdot N_o(s-1) - [1 - \mathfrak{A}_U(s)] \cdot L_o(s) \cdot N_o(s) \quad (6)$$

$$\tau_Z = \mathfrak{A}_Z(s-1) \cdot L_o(s-1) \cdot [1 - N_o(s-1)] - [1 - \mathfrak{A}_Z(s)] \cdot L_o(s) \cdot [1 - N_o(s)] \quad (7)$$

Somit sind auch für den zweiten Strang die Abschälverhältnisse berechenbar, wenn die Werte der Transporte τ_U und τ_Z bekannt sind. Dazu werden in der Versuchskaskade die Stromstärken der Helium-Rückspeisung τ_Z bzw. der UF_6 -Einspeisung U 3 mit den überkritischen Blenden D 2 bzw. D 3 gemessen. Außerdem wird die UF_6 -Konzentration in der leichten Fraktion der Stufe 10, welche in die UF_6 -Abscheidung eingespeist wird, gemessen.

Nach dieser Methode werden im Kaskaden-Überwachungsprogramm alle Abschälverhältnisse routinemäßig berechnet und stehen damit als zusätzliche Information dem Kaskaden-Operator zur Verfügung.

4. Die Inbetriebnahme-Prozeduren

Bei der Bestimmung des aktuellen Kaskadenzustandes während des laufenden Anreicherungsbetriebes muß der Überwachungsrechner auf die Komponentendaten der Trenndüsen bzw. der Verdichter zurückgreifen. Die Aufnahme und Darstellung dieser Daten in Form von Kennlinien erfolgt üblicherweise während der Inbetriebnahme der Komponenten bei deren Abnahme-Messungen und wird deshalb als Inbetriebnahme-Prozedur bezeichnet.

4.1 Die Ermittlung der Durchflußkennlinien der Trenndüsen

Die routinemäßig durchzuführende Berechnung der abgeleiteten Betriebsgröße Düsendurchsatz L_0 in allen Stufen aus den Meßwerten Düsenvordruck p_0 und UF_6 -Konzentration N_0 im Ausgangsgas erfordert die Kenntnis der individuellen Durchflußkennlinien der Trenndüsen. Ihre routinemäßige Aufnahme und Darstellung wurde für die beiden Inert-Gase Helium und Stickstoff, für das Verfahrensgas Helium/5 Mol-% UF_6 mit dem Molekulargewicht $M = 21,4$ und für ein Gemisch aus Helium/Stickstoff mit ebenfalls $M = 21,4$ durchgeführt. In der Abbildung 5 sind als Beispiel die ermittelten Durchflußkennlinien einer Trenndüse (Stufe 1) als Düsendurchsatz- L_0 (g Mol/h) über dem Düsenvordruck p_0 (Torr) dargestellt, wie sie für vier verschiedene Gasgemische ermittelt wurden.

Bei der Aufnahme der Kennlinien werden alle Leitungen für die schweren Fraktionen durch Ventile unmittelbar hinter den Trenndüsen abgesperrt. Somit haben alle Düsen den gleichen Durchsatz L_0 , der aus dem Vordruck p_2 der Überschallblende D 2 mit deren bekannter Durchflußcharakteristik ermittelt wurde. Die Variation des Düsendurchsatzes L_0 wurde durch eine schrittweise Erhöhung der Anlagenfüllung erreicht. Um die Roots-Verdichter vor Überlastung zu schützen, wurde eine maximale Druckdifferenz zwischen Druck- und

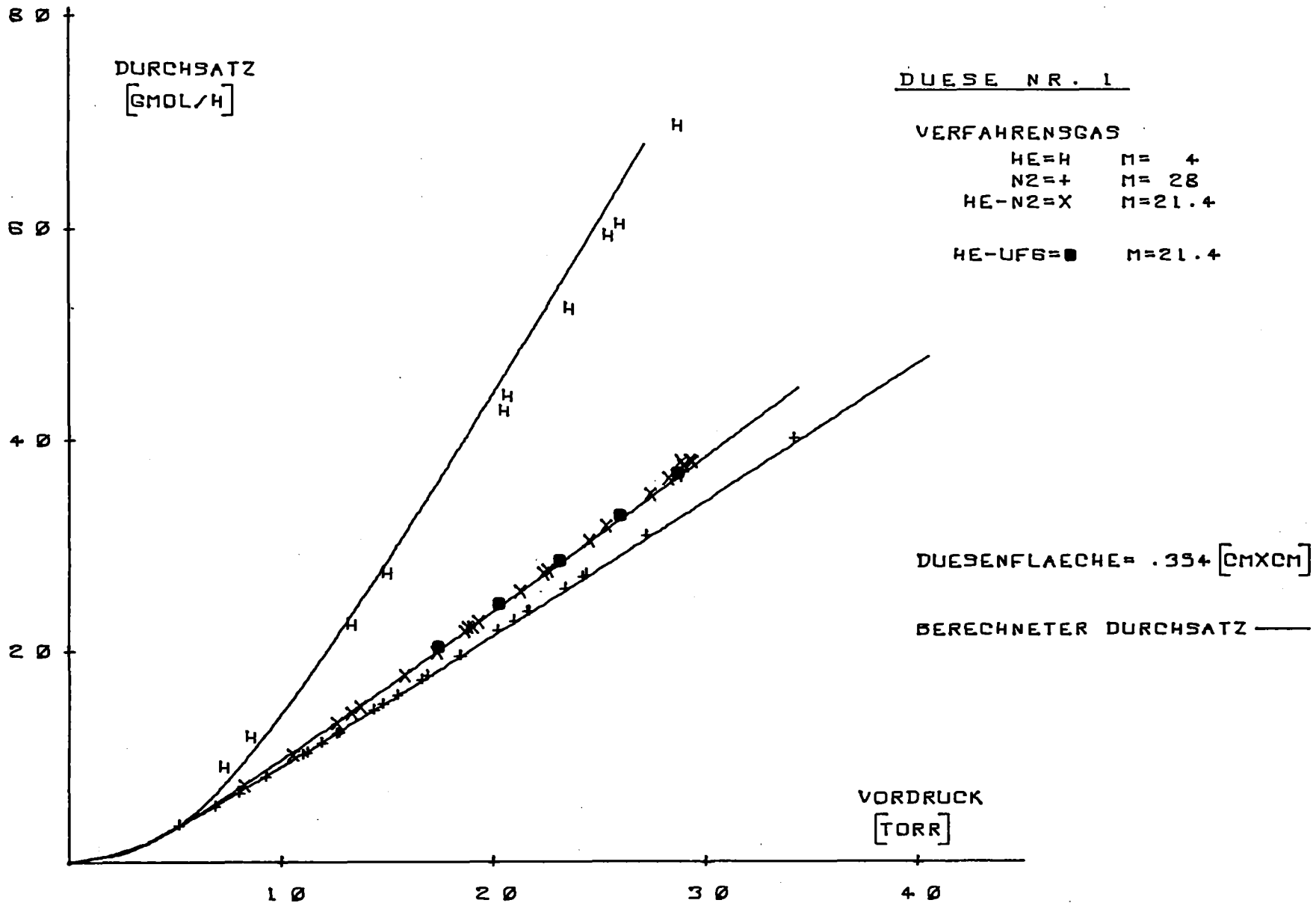


Abb. 5: Die Durchflußkennlinien einer Trenndüse für vier verschiedene Gasgemische. Die Aufnahme und Darstellung erfolgt mit der im Anhang B angegebenen Inbetriebnahme-Prozedur "Durchflußkennlinien". Berechnete Durchsatzkurven nach Gl. (9) und (10).

Saugseite von 30 Torr zugelassen. Damit lagen die höchsten Durchsätze der benutzten Verfahrensgase bei ca. 70 g Mol/h für He und bei ca. 40 g Mol/h für die Verfahrensgase N₂, He/N₂, He/5 Mol-% UF₆.

Der Berechnung des Düsendurchsatzes liegt das Durchflußverhalten einer überkritischen Laval-Düse zugrunde /9/, deren theoretischer Durchsatz nach Gleichung (8) berechnet werden kann.

$$L_{\text{theor}} = \rho_0 \cdot c_0 \cdot F \cdot \psi \quad [\text{Masse/Zeit}] \quad (8)$$

$$c_0 = \sqrt{\kappa R_i \cdot T_0} \quad \text{Ruheschallgeschwindigkeit}$$

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R_i \cdot T_0} \quad \text{Ruhedichte}$$

$$\psi = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad \text{Durchflußfunktion für überkritisches Expansionsverhältnis}$$

- κ = Verhältnis der spezifischen Wärmen
- R_i = individuelle Gaskonstante
- T_0 = Temperatur des Verfahrensgases
- p_0 = Düsenvordruck
- F = engster Düsenquerschnitt

Vernachlässigt man für die Berechnung des tatsächlichen Durchsatzes den Einfluß des Expansionsverhältnisses p_0/p_M und korrigiert den theoretischen Durchsatz mit einem nur von der Reynolds-Zahl Re abhängigen Durchflußfaktor $\Gamma(Re)$, so ist der effektive Moldurchsatz L_0 pro Zeiteinheit:

$$L_o = \frac{F \cdot p_o}{\sqrt{M_o}} \cdot \psi \sqrt{\frac{\kappa}{R_a \cdot T_o}} \cdot \Gamma_{(Re)} \quad [\text{Mol/Zeit}] \quad (9)$$

M_o = mittleres Molekulargewicht im Ausgangsgas

R_a = allgemeine Gaskonstante

N_o = UF_6 -Konzentration im Ausgangsgas

Die Temperatur T_o des Verfahrensgases wird für alle Düsen gleich groß angesetzt und das Verhältnis der spezifischen Wärme κ wird für das jeweilige Gasgemisch aus den spezifischen Wärmen der Komponenten linear gemittelt. Damit kann bei Kenntnis des Düsenquerschnittes F und des Durchflußfaktors $\Gamma_{(Re)}$ der Düsendurchsatz L_o aus den gemessenen Größen Düsenvordruck p_o und UF_6 -Konzentration N_o berechnet werden.

Diese von Expansionsverhältnis p_o/p_M unabhängige Darstellungsweise der Durchsatzfunktion gilt für Expansionsverhältnisse $p_o/p_M \geq 2,5$ wie sie im Normal-Betrieb der Pilotanlage stets erzielt werden. Die Messungen der Durchflüsse der neun Trenndüsen ergaben für Reynolds-Zahlen $Re \geq 15$ folgende mittlere Reynolds-Zahlabhängigkeit des Durchflußfaktors

$$\Gamma_{(Re)} = 1 - 2,6(Re + 6,923)^{-0,568} \quad \text{für } Re \geq 15 \quad (10)$$

$$Re = \frac{L_{\text{theor}}}{l \cdot \eta}$$

l = Düsenlänge

η = dynamische Zähigkeit

Diese Darstellung liefert für $Re \geq 20$ praktisch die nach /10/ für technische Trennelemente ermittelte Reynolds-Zahlabhängigkeit des Durchflußfaktors.

Die über einen hinreichend großen Bereich nahezu lineare Druckabhängigkeit der Durchflußkennlinien und die Notwendigkeit einer exakten Berechnung des Düsendurchsatzes nur in der Umgebung des Sollbetriebspunktes erlauben für die Durchsatzberechnung einen linearen Ansatz wie er gemäß Gl. (11) für Expansionsverhältnisse p_o/p_M größer als 2,5 ermittelt wurde. Dieser konnte der Berechnung des Düsendurchsatzes L_o zur Bestimmung des Kaskadenzustandes der Einfachheit halber und ohne Einbuße an Genauigkeit zugrunde gelegt werden:

$$L_o = F \cdot \beta (p_o - \bar{p}) \cdot \sqrt{\frac{M^+}{M}} \quad [\text{g Mol/h}] \quad (11)$$

Die Druckkorrektur \bar{p} wurde aus dem Mittelwert der linearen Näherungen aller Düsen für ein Verfahrensgas mit dem Molekulargewicht $M^+ = 21,4$ (entspricht He/5 Mol-% UF_6) bestimmt und hat den Wert $\bar{p} = 3,7$ Torr, wobei die Standardabweichung $\sigma = \pm 0,25$ Torr beträgt. Der "Durchflußbeiwert" β ist eine gasspezifische Größe (vgl. Gl. (9)) und hat für das benutzte Verfahrensgas den Wert $\beta = 4,16 \left[\frac{\text{g Mol}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{Torr}} \right]$

Der Düsendurchsatz für He/ UF_6 -Gemische kann somit in guter Näherung nach Gleichung (11) berechnet werden, wobei die notwendigen Größen den nachstehenden Tabellen zu entnehmen sind.

Düse Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fläche F (cm ²)	0,356	0,336	0,392	0,376	0,359	0,342	0,358	0,352	0,359	0,296

Tabelle 1: Die mittleren Düsenquerschnitte F der 10 Trenndüsen.

Verfahrensgas	Druckkorrektur \bar{p} [Torr]	Durchflußbeiwert $\beta \left[\frac{\text{g Mol}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{Torr}} \right]$	Molekulargewicht M^+ [g/Mol]
He/5Mol-%UF ₆ He/N ₂	3,7 ± 0,25	4,16	21,4

Tabelle 2: Zahlenwerte zur Durchsatzberechnung nach Gleichung (11) für He/UF₆-Gemische und für ein He/N₂-Gemisch mit dem gleichen Mittleren Molekulargewicht.

Von dem der Kaskaden-Überwachung dienenden Hauptprogramm wird das zur Erfassung und Darstellung der Durchflußkennlinien notwendige Programmpaket mittels einer Programmvorwahl angewählt. Als typisches Beispiel für die routinemäßige Darstellung der Durchflußcharakteristiken sind in Abb. 5 alle Meßwerte der Trenndüse Nr. 1 und die dazu ermittelten Durchsatzfunktionen für vier verschiedene Gase nach Gl. (9) und (10) wiedergegeben.

Da für die Durchfluß-Kennlinien eine große Anzahl von Meßpunkten erforderlich ist, erfolgt die Erfassung der Durchflußcharakteristik in zwei zeitlich getrennten Abschnitten:

1. Im ersten Abschnitt werden während der Versuchsdauer die Meßwerte auf Band gespeichert und der Anlagenzustand in Form eines Betriebsprotokolls auf dem Bildschirm bzw. auf dem Schnelldrucker ausgegeben. Nach Versuchsende werden die Meßdaten vom Magnetband auf eine Magnetplatte übertragen.
2. Die graphische Darstellung der Durchflußcharakteristik erfolgt in einem zweiten Abschnitt. Hierin werden durch einen an den Rechner angeschlossenen Plotter (Typ WANG 2212) die gespeicherten Meßwerte aufgetragen, die Durchsatzkurve nach Gleichung (9) und (10) eingezeichnet und das Diagramm entsprechend den Versuchsbedingungen beschriftet.

Die hierzu notwendigen Unterprogramme sind in einer Inbetriebnahme-Routine "Durchflußkennlinien" zusammengefaßt.

4.2 Die Ermittlung der Verdichter-Kennlinien

Als Verfahrensgas wurde bei diesen Messungen He/N₂-Gemisch (M = 21,4) gewählt. Bei geschlossenen Leitungen für die schweren Fraktionen wurde wie bei der Ermittlung der Trenndüsen-Kennlinien allen Verdichtern der gleiche Gasdurchsatz und die gleiche Gemischzusammensetzung aufgezwungen. Der Durchsatz wurde ebenfalls mit der Meßblende D 2 kontrolliert. Für drei Stellungen der Verdichternebenschlußventile NV (geschlossen, 65 Skalenteile geöffnet und 100 Skalenteile geöffnet) wurden die Kompressionsverhältnisse (Gegendruck p_0 zu Ansaugdrucke p_M) bei verschiedenen Werten des Verdichtergegendruckes gemessen. Die Änderung des Gegendruckes wurde bei gleicher Stellung des Nebenschlußventils NV durch Variation der Anlagenfüllung (Durchsatz ~ Düsen vordruck) erreicht. Die Abbildung 6 gibt als Beispiel die aufgenommenen Kennlinien für den Verdichter Nr. 1 wieder. Das zur Aufnahme der Versuchsdaten und zur Darstellung der Kennlinien notwendige Programmpaket wird ebenfalls vom Hauptprogramm aus angewählt und ist als Inbetriebnahme-Prozedur "Verdichter-Kennlinien" zu einem Unterprogramm zusammengefaßt.

Die auf der Magnetplatte gespeicherten Meßdaten werden mit dem an den Rechner angeschlossenen Plotter aufgezeichnet. Anschließend wird das Kennliniendiagramm beschriftet und die Versuchsbedingungen eingetragen. Da hier keine einheitlich formulierbaren Kennlinien erwartet werden können, wurden die eingetragenen Ausgleichskurven von Hand eingezeichnet. Bei Benutzung einer üblichen Interpolationsroutine könnten diese Kurven ebenfalls vom Rechner eingetragen werden.

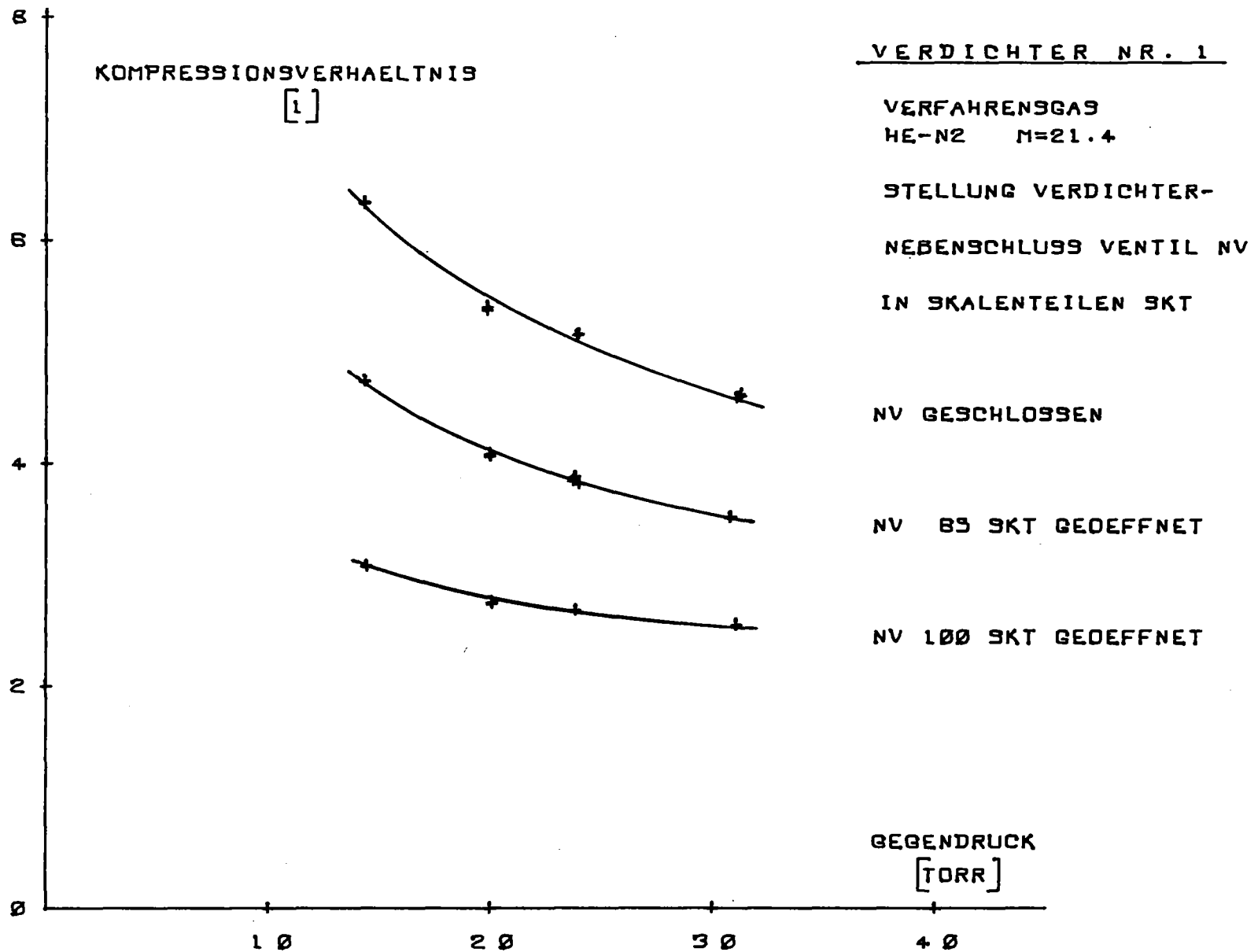


Abb. 6: Die Kennlinien eines Rootsverdichters der Pilot-Anlage. Die Aufnahme und die Aufzeichnung aller Meßpunkte, sowie die Eintragung der Versuchsbedingungen erfolgen als Inbetriebnahme-Prozedur mit dem Unterprogramm "Verdichterkennlinien".

5. Die rechnerunterstützte Kaskadenüberwachung

Die hier erarbeitete Rechnerunterstützung für die Kaskadenüberwachung soll die Einregelung der Kaskade in den Sollzustand erleichtern und eine einfache Überwachung und Einhaltung dieses Sollzustandes ermöglichen. Die Größe notwendiger Regeleingriffe sollte hier nicht vorausberechnet werden. Sie ist jedoch aus dem Grad der Abweichung des Istzustandes vom Sollzustand und der Änderung dieser Abweichung nach einem vorgenommenen Regeleingriff leicht zu beurteilen, weil in dem hier realisierten on-line-Betrieb eine ständige Neuberechnung des aktuellen Kaskadenzustandes und seiner Abweichungen vom gewünschten Sollzustand erfolgt. Beide Aussagen werden dazu fortlaufend in geeigneter Form durch die Peripherie des angeschlossenen Rechners ausgegeben; ihre Darstellung erfolgt einerseits digital über das Datensichtgerät oder über den Schnelldrucker in Form eines "Kaskadenprotokolls", andererseits auch analog in graphischer Darstellung durch den Plotter als "Kaskaden-Charakteristik".

5.1 Die Kaskaden-Betriebs-Prozedur

Im Rahmen dieser Prozedur werden die im Abschnitt 5 genannten Aufgaben von einem weiteren Paket von Unterprogrammen ausgeführt, welche vom Hauptprogramm aus ausgewählt werden. Dieses Programmpaket wird als "Kaskaden-Betriebs-Prozedur" bezeichnet. Mit dieser Programmkombination ist in einem wählbaren zeitlichen Abstand oder auf Abruf eine übersichtliche graphische Darstellung der Abweichungen der Betriebsgrößen Druck, UF_6 -Konzentration und der Abschälverhältnisse von ihren Sollbetriebswerten möglich, wie die folgenden Abbildungen 7 bis 9 zeigen. Außerdem können unter Zeitprotokollierung Klartext-Kommentare (z.B. Regeleingriffe in Form von Änderungen von Ventilstellungen) in den abzuspeichenden Datensatz übernommen werden und als Übersichtsprotokoll getrennt ausgedruckt werden (Tabelle 3).

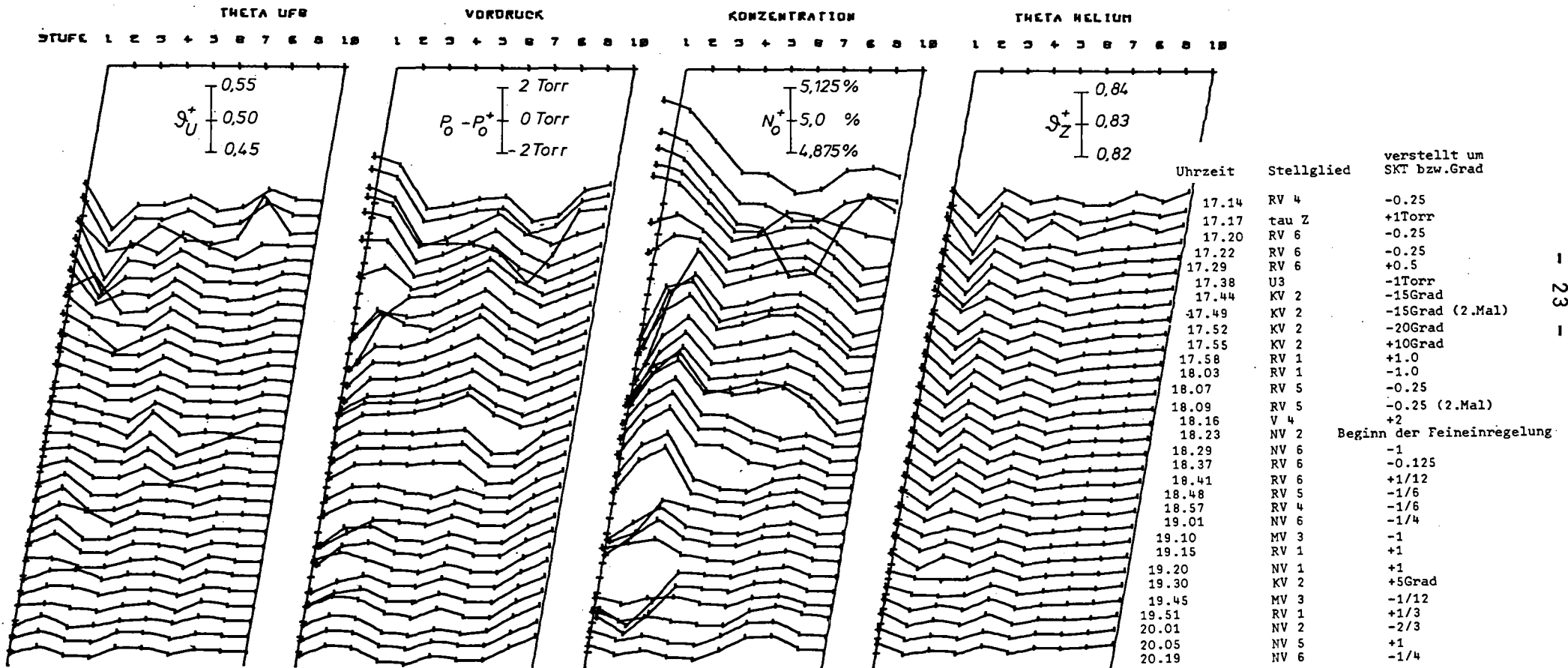


Abb. 7: Zeitlich aufeinanderfolgende "Kaskaden-Charakteristiken" bei der Einregelung der anfänglich nicht justierten Pilot-Anlage. Die durchgeführten Regeleingriffe nach dem zugehörigen Übersichtsprotokoll in Tab. 3 sind zur Erläuterung am Rande zugefügt worden.

Uhrzeit	Stellglied	verstellt um SKT bzw. Grad
17.14	RV 4	-.25
17.17	tau Z	+1 Torr
17.20	RV 6	-.25
17.22	RV 6	-.25
17.29	RV 6	+.50
17.38	U3	-1 Torr
17.44	KV 2	-15 Grad
17.49	KV 2	-15 Grad (2 Mal)
17.52	KV 2	-20 Grad
17.55	KV 2	+10 Grad
17.58	RV 1	+1 Grad
18.03	RV 1	-1 Grad
18.07	RV 5	-.25
18.09	RV 5	-.25 (2 Mal)
18.16	V 4	+2
18.23	NV 2	-1 Beginn der Feineinregelung
18.29	NV 6	-1
18.37	RV 6	-.125
18.41	RV 6	+1/12
18.48	RV 5	-1/6
18.57	RV 4	-1/6
19.01	NV 6	-1/4
19.10	MV 3	-1
19.15	RV 1	+1
19.20	NV 1	+1
19.30	KV 2	+5 Grad
19.45	MV 3	-1/12
19.51	RV 1	+1/3
20.01	NV 2	-2/3
20.05	NV 5	+1
20.19	NV 6	-1/4

Tabelle 3: Abdruck eines Übersichtsprotokolls der Steuerungsmaßnahmen beim Einregeln der Pilot-Anlage nach Abb. 7.

5.2 Kaskaden-Einregelung mit Hilfe der Betriebs-Prozedur

Mit den von der "Kaskaden-Betriebs-Prozedur" erzeugten Diagrammen können Störungen in den einzelnen Stufen klar erkannt werden und sind dann durch geeignete Regeleingriffe leicht zu beseitigen. In der Abbildung 7 ist eine nach dieser Methode durchgeführte Einregelung der zuvor nicht justierten Kaskade dargestellt. Dabei hat sich das nachfolgend skizzierte Verfahren bewährt.

Zuerst werden, ausgehend vom Kaskadenkopf in einer Grobeinstellung die UF_6 -Abschälverhältnisse \mathcal{D}_U und die Düsengaskonzentrationen N_O ungefähr auf Sollwert gebracht. Dabei wird zunächst die maximale positive Abweichung im Uranabschälverhältnis \mathcal{D}_U durch Verstellen des Rückstauventiles (RV) in der entsprechenden Stufe ausgeglichen, wenn im Mittel über alle Stufen die Drucke p_O und die UF_6 -Konzentrationen N_O zu niedrig liegen. Hierdurch wird zugleich der UF_6 -Inhalt der Kaskade im richtigen Sinne korrigiert. Bei zu hohem Uran-Inventar wird sinngemäß stets in der Stufe mit der größten negativen Abweichung des Abschälverhältnisses \mathcal{D}_U eingegriffen. Ein insgesamt zu hohes Niveau in der Konzentration bei gleichzeitig zu niedrigen Vordrucken kann durch Erhöhung der Helium-Rückspeise-Stromstärke τ_Z ausgeglichen werden. Bei zu niedrigen Konzentrationen und zu hohen Vordrucken wird τ_Z erniedrigt. Anschließend werden die größten Abweichungen der Helium-Abschälverhältnisse durch Änderung der Expansionsverhältnisse mit den Verdichter-Nebenschlußventilen (NV) eingeregelt. Danach muß eine Nachregelung der übrigen Betriebswerte erfolgen. Der Gang einer solchen Einregelung kann anhand der graphischen Darstellung der zeitlich aufeinander folgenden "Kaskaden-Charakteristiken" verfolgt werden.

5.3 Erfassung typischer Störungsauswirkungen

In den Abbildungen 8 und 9 sind die Auswirkungen von zwei typischen "Störungen" in der Stufe 6 auf die eingeregelterte Kaskade wiedergegeben.

Abb. 8 zeigt, wie sich eine Erniedrigung des Kompressionsverhältnisses des Verdichters 6 (Verstellung des Verdichter-Nebenschlußventiles NV6) vom geschlossenen Zustand (Sollstellung) auf 20 Skalenteile (Öffnung) auswirkt. Danach wurde diese Maßnahme wieder rückgängig gemacht und der Ausgangszustand der Kaskade stellte sich wieder ein.

In gleicher Weise wurde das Rückstauverhältnis in der schweren Fraktion der Stufe 8 erhöht durch eine Änderung der Ventilstellung am Rückstau-Ventil RV6 (Öffnung 25 SKT (Sollstellung) erniedrigt auf 22.5 SKT). Der sich daraufhin einstellende stationäre, gestörte Zustand und der nach Wegnahme dieser Störung sich einstellende stationäre ursprüngliche Kaskadenzustand sind in der Abbildung 9 dargestellt.

Jeder der vorgenommenen Eingriffe zeichnet sich in der graphischen Darstellung durch ein typisches quantitatives Erscheinungsbild aus und liefert somit dem Kaskadenoperator ein typisches Erkennungsmuster. Damit kann bei entsprechender Übung ein verbessertes Erkennen von Störungsursachen vorbereitet werden. Da außerdem bei jedem Meßzyklus der volle Datensatz des Kaskadenzustandes auch in numerischer Form zur Verfügung steht, wird mit den abgespeicherten Versuchswerten eine Datensammlung erzeugt, die für eine analytische Methode zur Störungserkennung durch den Rechner selbst zur Verfügung steht. Damit konnte mit der vorliegenden Arbeit die Grundlage für den nächsten Schritt in der Anwendung der on-line-Rechnerüberwachung von Trenndüsen-Kaskaden vorbereitet werden.

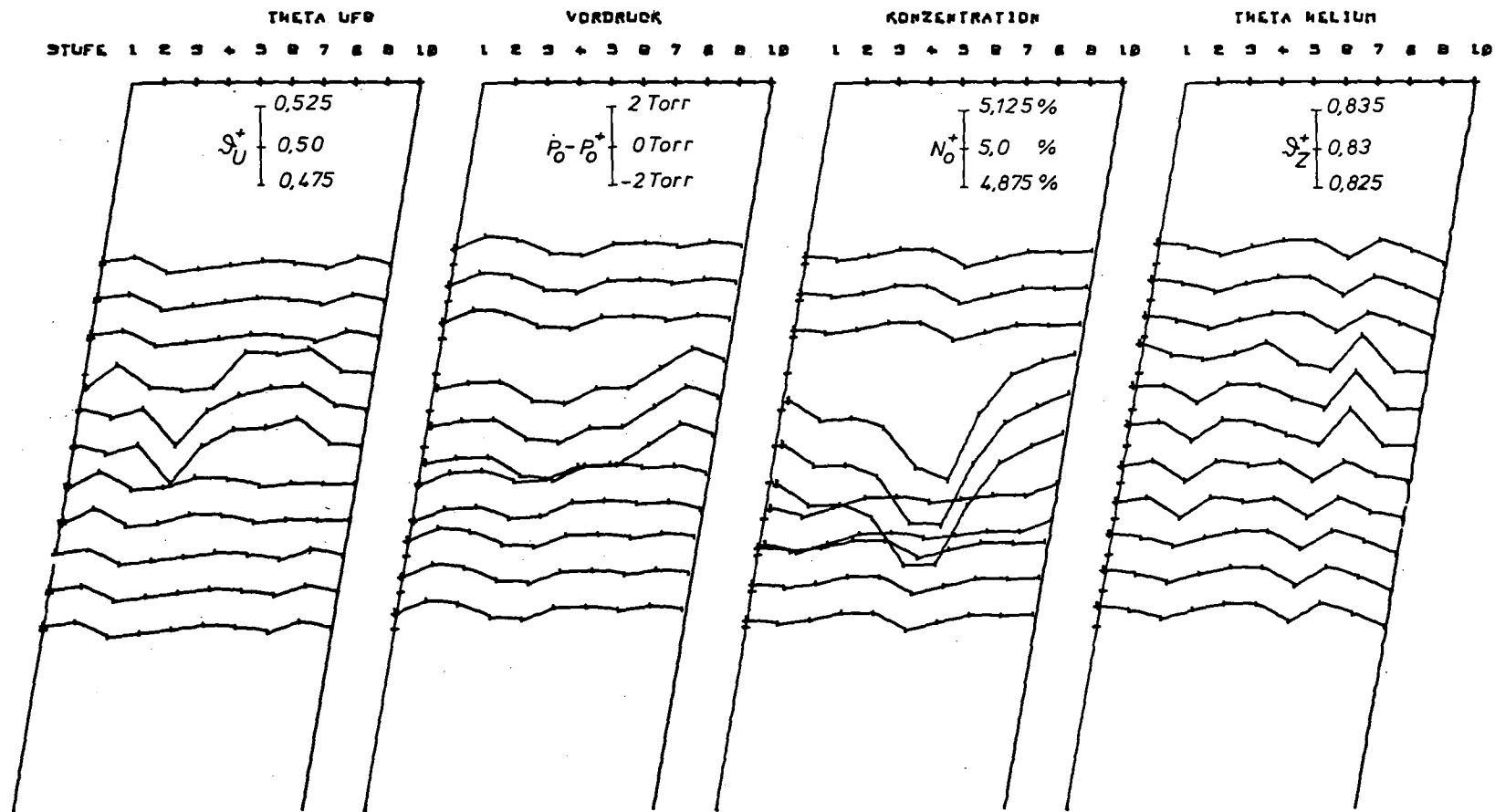


Abb. 8: Die Auswirkung einer Verringerung des Expansionsverhältnisses in der Stufe 6 auf die eingeregelter Pilot-Anlage durch Verstellung des Verdichternebenschlussventiles NV6.

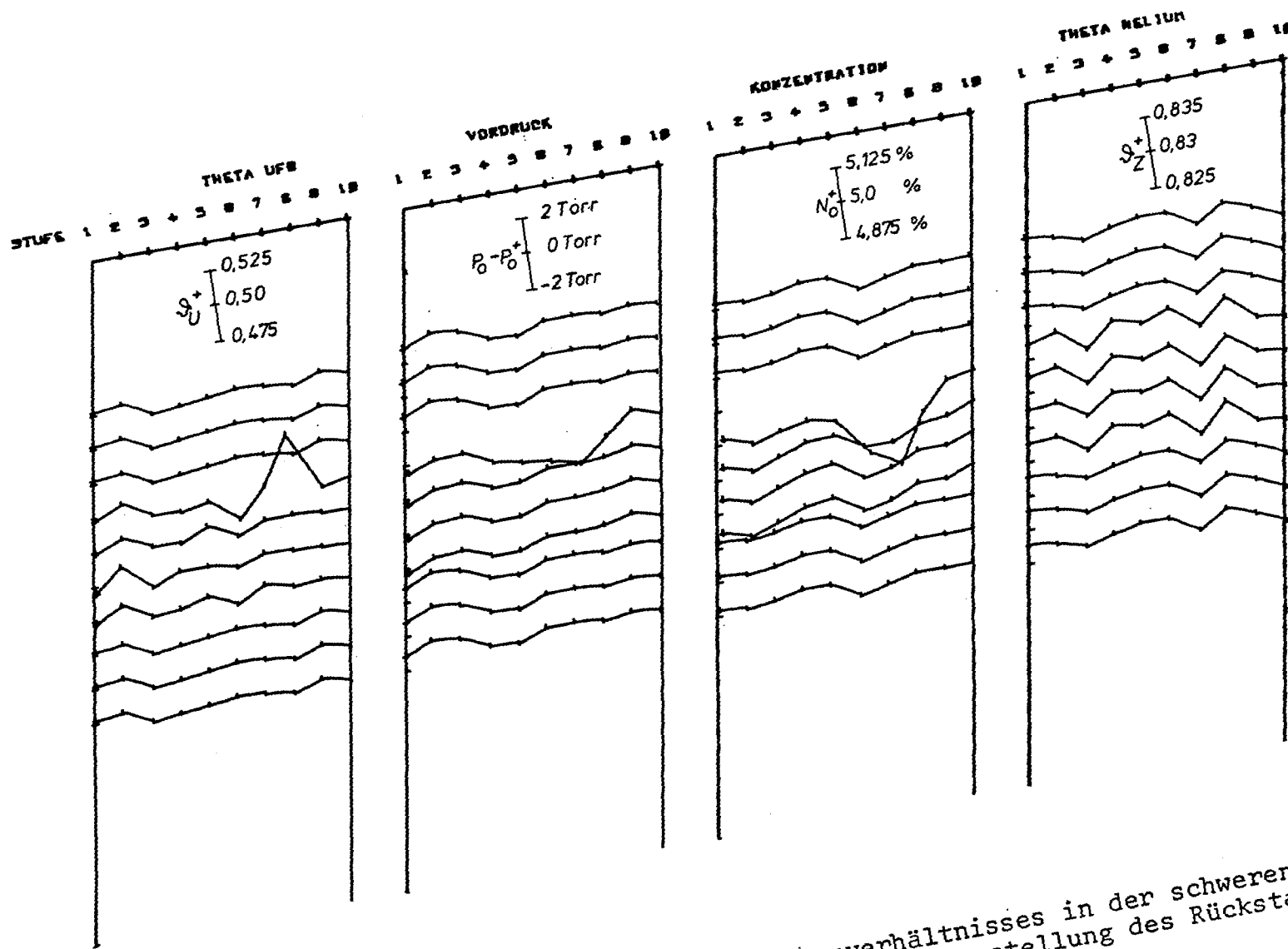


Abb. 9: Die Auswirkung einer Erhöhung des Rückstauverhältnisses in der schweren Fraktion der Stufe 8 auf die eingeregelter Pilot-Anlage durch Verstellung des Rückstauventils RV6.

Literaturverzeichnis

- /1/ R. Schütte, D. Seidel, W. Fritz, D. Plesch, G. Linder, H. J. Fritsch: Experimentelle und theoretische Untersuchungen des stationären Betriebsverhaltens von Trenndüsenkaskaden für die 235-U-Anreicherung. Chemie-Ingenieur-Technik 44, 1099 (1972).

- /2/ R. Schütte: Konzept zur Führung des Anlagenbetriebes in industriellen Trenndüsenkaskaden. (1976), unveröffentlicht.

- /3/ H. Steinhaus: Programmsystem des Kleinrechners WANG 2200 zur automatischen Meßwerterfassung und Prozeßsteuerung der UF₆-Abscheidungsanlage. (1976), unveröffentlicht.

- /4/ E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel: Separation of the Isotopes of Uranium by the Separation Nozzle Process. Angewandte Chemie intern. Ed. 6, 507 (1967).

- /5/ E.W. Becker, W. Bier, G. Frey, R. Schütte: Trenndüsen-Demonstrationsanlage für die Urananreicherung. atomwirtschaft - atomtechnik 14, 249 (1969).

- /6/ H. J. Fritsch, R. Schütte: Trennung von UF₆ und Zusatzgas bei Trenndüsenanlagen mit einer Kombination von Vorabscheidungs-Trenndüse und Tieftemperatur-Feinabscheidung. KFK 1437 (1971).

- /7/ D. Plesch, R. Schütte: Entwicklung und Erprobung einer Wärmeleitzelle zur Messung des UF₆-Gehaltes im Verfahrensgas einer Trenndüsenkaskade. KFK 1824 (1973).

- /8/ J. Schmid, R. Schütte: Experimentelle Untersuchung der Tieftemperatur-Desublimation von Uranhexafluorid aus Gemischen mit Wasserstoff in Gegenstrom-Kompaktwärmetauschern. KFK 2428 (1977).

- /9/ J. Zierrep: Vorlesungen über theoretische Gasdynamik. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1963.

- /10/ W. Berkahn, P. Bley: Einfluß des Expansionsverhältnisses auf den Gasdurchsatz bei Trenndüsenanlagen mit parallelem Düsenkanal. (1974), unveröffentlicht.