

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

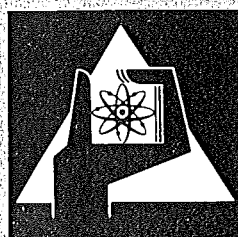
Mai 1973

KFK 1801

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Die Betriebsgrenzen einer technischen Trenndüsenstufe
zur Anreicherung von Uran 235**

D. Seidel, U. Sieber



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KFK 1801

Institut für Kernverfahrenstechnik

DIE BETRIEBSGRENZEN EINER TECHNISCHEN TRENNDÜSEN-
STUFE ZUR ANREICHERUNG VON URAN 235

von

D. Seidel

U. Sieber ⁺⁾

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

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

Zusammenfassung

Beim Betrieb einer technischen Trenndüsenstufe in einer Anreicherungskaskade können bei Betriebsstörungen erhebliche Abweichungen von den Auslegungsdrücken und -konzentrationen auftreten, die unter Umständen zu einer Überschreitung der für die Stufenkomponenten zulässigen Betriebsgrenzen führen können. Diese Betriebsgrenzen der integrierten aus Antriebsmotor, Verdichter mit Kühler und Trenntank bestehenden Trenndüsenstufe sind die Leistungsgrenze des Motors, die Pumpgrenze des Verdichters, sowie die Temperaturgrenze des Verdichterrades. An einer technischen Trenndüsenstufe werden die Verdichterkennfelder und die Kennlinien eines technischen Trennelementes mit UF_6/He -Gemischen mit 3 bis 7 Mol % UF_6 und bei Drücken zwischen 300 und 600 Torr experimentell ermittelt. Die durch Kombination der Verdichter- und Trennelement-Kennlinien ermittelten Betriebspunkte einer Trenndüsenstufe und ihre Betriebsgrenzen werden in einem Betriebsdiagramm übersichtlich dargestellt.

Es zeigt sich, daß - vom Auslegungspunkt ausgehend - bei Konzentrationsänderungen sich der Abstand zur Pumpgrenze hin nur geringfügig ändert. Druckabsenkungen hingegen sind durch die Pumpgrenze bedingt nur auf 200 bis 300 Torr möglich. Bei Druck und/oder Konzentrationssteigerungen tritt eine wesentliche Zunahme der Leistungsaufnahme ein, weshalb für den Verdichtermotor in einer Anreicherungsfabrik eine ausreichende Leistungsreserve einzuplanen ist. Es wird gezeigt, daß die Temperaturgrenze des Verdichterlaufrades sich als eine Konzentrationsgrenze bei etwa 6,2 Mol % darstellt. Es wird weiterhin gezeigt, daß das Erkennen von Änderungen der Charakteristiken von Verdichter und Trennelementen anhand des Betriebsdiagramms möglich ist.

The Operating Limits of a Technical Separation Nozzle Stage for U-235 Enrichment

Summary

When operating a technical separation nozzle stage in an enrichment cascade disturbances may cause such significant deviations from the design pressures and concentrations that under adverse conditions the operating limits defined for the stage components may be exceeded. These operating limits of the integrated separation nozzle stage consisting of driving motor, compressor with cooler, and separation tank are the limit of capacity of the motor, the pulsation point of the compressor, and the temperature limit of the impeller. For a technical separation nozzle stage the compressor characteristics as well as the characteristic curves of a technical separation element are determined experimentally with UF_6/He mixtures containing 3 to 7 mol% of UF_6 and at pressures ranging from 300 to 600 torr. The operating points of a separation nozzle stage determined by combination of the characteristics of both compressor and separation element as well as their operating limits are elucidated in a process diagram.

It appears that taking the design point as the basis the distance from the surge point varies but insignificantly with changes in concentration. By contrast, pressure reductions are possible only down to 200 to 300 torr on account of the surge point. With an increase in pressure and/or concentration the rate of power input increases considerably which means that a sufficient margin of power must be provided for the compressor motor in an enrichment plant. It is shown that the temperature limit of the impeller is identical to the concentration limit up to some 6.2 mol%. Moreover, it is demonstrated that changes in the characteristics of the compressor and separation elements are visible from the process diagram.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Aufgabenstellung	3
2. Versuchsaufbau und Versuchstechnik	
2.1 Beschreibung der Stufe	6
2.2 Beschreibung der Hilfseinrichtungen	9
2.3 Beschreibung der Meßeinrichtungen	13
2.4 Versuchsvorbereitung	16
3. Experimente	
3.1 Allgemeine Gesichtspunkte	17
3.2 Das Verdichterkennfeld bei Nenn- drehzahl und veränderlicher UF ₆ - Konzentration	18
3.3 Das Verdichterkennfeld bei Nenn- konzentration und veränderlicher Drehzahl	21
3.4 Abhängigkeit der Durchflußziffer der Trennelemente vom Druck	21
4. Ermittlung der Betriebsgrenzen	26
5. Diskussion der Ergebnisse	31

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Im Institut für Kernverfahrenstechnik wurde in den letzten Jahren eine neue Methode zur Anreicherung des für die Brennstoffversorgung von Kernkraftwerken notwendigen leichten Uranisotops U-235 entwickelt¹⁾. Diese als Trenndüsenverfahren bezeichnete Methode beruht auf der teilweisen räumlichen Entmischung der Uranisotope in einer expandierenden, auf gekrümmten Bahnen verlaufenden Gasströmung aus einem UF_6 /Helium- oder Wasserstoffgemisch.

Abb. 1 zeigt einen Schnitt durch die stark vergrößerte Trenndüse mit den wichtigsten Betriebsparametern. Zur Erzielung des erforderlichen Gasdurchsatzes kann die Anordnung senkrecht zur Zeichenebene im Prinzip beliebig ausgedehnt werden. Die schlitzförmigen Trenndüsen-systeme sind bei der heute benutzten Technik auf rohrförmige Träger aufgebracht, die Kammern für die Zufuhr des Ausgangsgases und die Abfuhr der schweren Fraktion enthalten²⁾. Die leichte Fraktion wird in einen die Rohre umgebenden Tank geblasen. Der Trennelement-tank und der zur Kompression des expandierten Gases benutzte Radialverdichter mit Antrieb und Kühler bilden eine funktionelle Einheit, die als Trennstufe bezeichnet wird. Zur Erzielung technisch verwertbarer U^{235} -Konzentrationen müssen einige hundert solcher Trenndüsenstufen in einer Trennkaskade hintereinandergeschaltet werden.

Die Trennstufen einer Kaskade werden im Normalbetrieb einheitlich mit denjenigen Betriebsbedingungen gefahren, die den niedrigsten Produktpreis ergeben. Die Stufenkomponenten sind dabei so ausgelegt, daß eine Überlastung des Kompressorantriebs, eine Überhitzung des Kompressorlaufrades oder

1) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, *Angew. Chemie internat. Edit* 6, 507 (1967). Diese Arbeit enthält eine Zusammenstellung der früheren Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren.

2) E.W. Becker, W. Bier, G. Frey, R. Schütte, *Z. Atomwirtschaft* 14, 249 (1969).

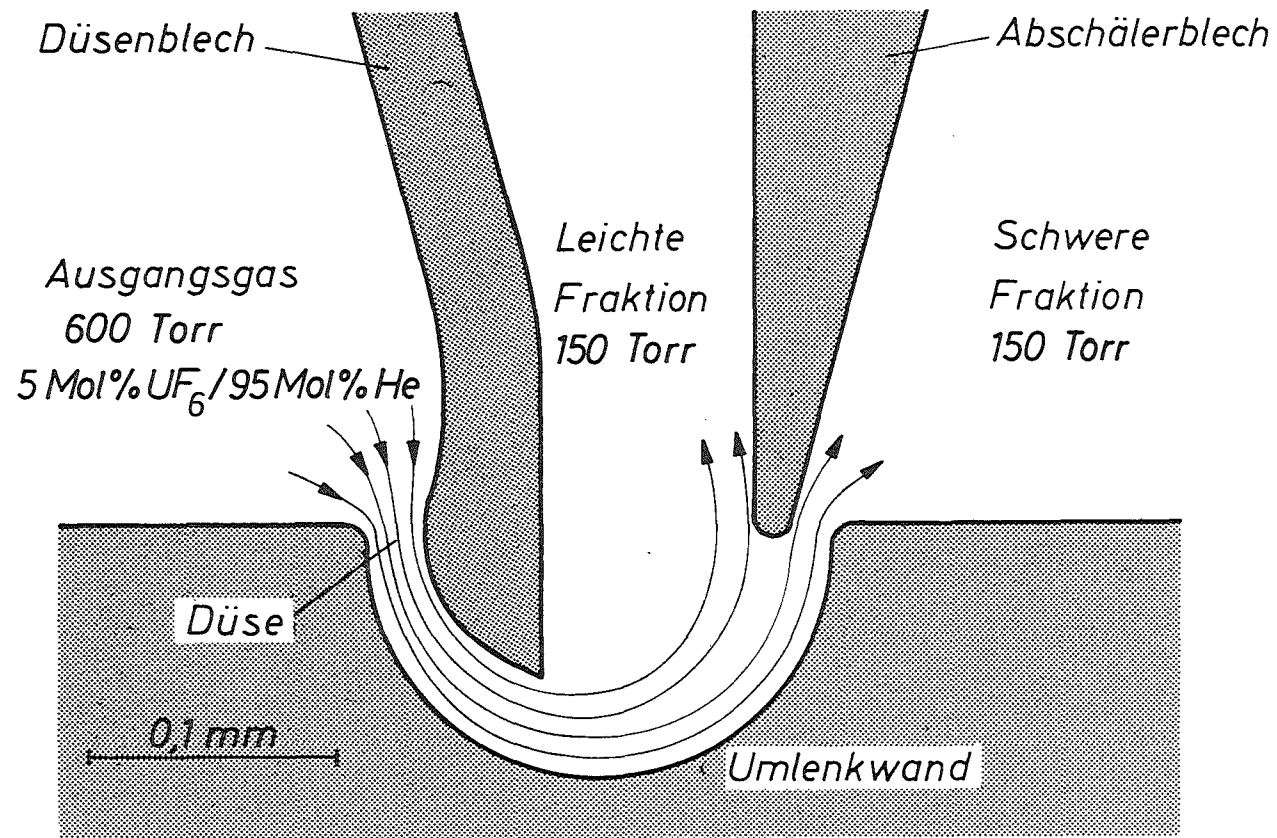


Abb. 1: Schnitt durch die Trenndüse mit den wichtigsten Betriebsparametern.

ein "Pumpen" des Kompressors im Normalbetrieb ausgeschlossen sind. Die Betriebsbedingungen können sich jedoch bei Störungen, z.B. beim Ausfall eines Kompressors, in Teilen der Kaskade erheblich ändern.

Wegen der mit einer Überschreitung der genannten Betriebsgrenzen verbundenen Gefahren ist vorgesehen, die Fabrik in Gruppen von 10-20 Stufen aufzugliedern und bei erheblichen Störungen die betroffene Gruppe automatisch zu überbrücken und abzuschalten.

Zur Festlegung der Abschaltstrategie ist die Kenntnis der Betriebsgrenzen der Einzelstufe bei variablen Betriebsbedingungen erforderlich. Als veränderliche Betriebsbedingungen interessieren in diesem Zusammenhang vor allem die Gasdrucke und die Gaszusammensetzung³⁾.

In der Trennkaskade werden die Trennstufen so hintereinandergeschaltet, daß die im Trennelement stattfindende Entmischung von UF₆ und Zusatzgas durch die Zusammenschaltung am Eintritt des Kompressors rückgängig gemacht wird. Das für die Betriebsgrenzen wichtige Verdichterkennefeld kann daher mit einer Einzelstufe bestimmt werden, in der die Trennelemente durch geeignete Strömungswiderstände (Simulationsrohre) ersetzt sind. Die für die Betriebsgrenzen weiterhin maßgebliche Abhängigkeit der Durchflußziffer der Trennelemente vom Druck muß dabei in einem zusätzlichen Versuch bestimmt werden.

Zur Untersuchung der mit den Betriebsgrenzen zusammenhängenden Fragen wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit zusammen

3) Da in einer Trennfabrik die Kühlwassertemperatur durch den Ausfall einzelner Stufen praktisch nicht geändert wird, kann davon ausgegangen werden, daß die Ansaugtemperatur des Gases bei den angenommenen Störungen nahezu konstant bleibt. Die Betriebsgrenzen einer Trenndüsenstufe bei Veränderung von Gasdruck und Gastemperatur wurden für konstante Gaszusammensetzung in der Dissertation von K. Schubert (Karlsruhe 1971) in anderem Zusammenhang untersucht.

mit der Industrie eine technische Trenndüsenstufe gebaut und mit Simulationsrohren unter Verwendung des vorgesehenen UF_6/He -Gemisches getestet. Die Untersuchungen an den technischen Trennelementen wurden in einem zum Trenntank parallelgeschalteten Teststand durchgeführt.

2. Versuchsaufbau und Versuchstechnik

2.1 Beschreibung der Stufe

Abb. 2 zeigt einen Längsschnitt durch die Stufe. Der mit 20 Simulationsrohren gefüllte Tank⁴⁾ steht auf einem Kreuzstück, das zur Verteilung der ein- und austretenden Ausgangsgasströme dient und zur Abstützung der Stufe auf das Fundament benützt wird. An dem Kreuzstück hängt das Kühlergehäuse mit den beiden ringförmigen, konzentrisch angeordneten Zwischen- und Endkühlern⁵⁾ und daran anschließend der zweistufige Radialverdichter⁶⁾. Der Verdichter wird durch einen am Verdichtergehäuse angeflanschten Mittelfrequenzmotor⁷⁾ angetrieben, der zwischen 7000 und 9000 U/min drehzahlregelbar ist.

Das vom Verdichter auf 600 Torr komprimierte und vom Endkühler auf 35°C rückgekühlte Verfahrensgas strömt über das Kreuzstück unterhalb der schräg angeordneten Zwischenwand in die untere Kurzschlußleitung, wo mit einer Norm-Venturidüse die Durchsatzmessung erfolgt. Die Länge dieser Kurzschlußschleife ist durch die vor und hinter der Venturidüse notwendigen Beruhigungsstrecken bedingt. Der Strömungswiderstand des Gaskreislaufs kann durch eine von Hand einstellbare Drosselklappe erhöht werden. Durch gleichmäßig verteilte Bohrungen in den Simulationsrohren wird der Gasstrom, wie bei den Trennelementrohren, aufgeteilt und über

4) Tank, Kreuzstück und die beiden Kurzschlußleitungen von Leybold-Heraeus, Hanau geliefert

5) Hersteller: GEA, Bochum

6) Hersteller: Hispano-Suiza, Bois-Colombes (Frankreich)

7) Hersteller: Siemens A.G., Nürnberg

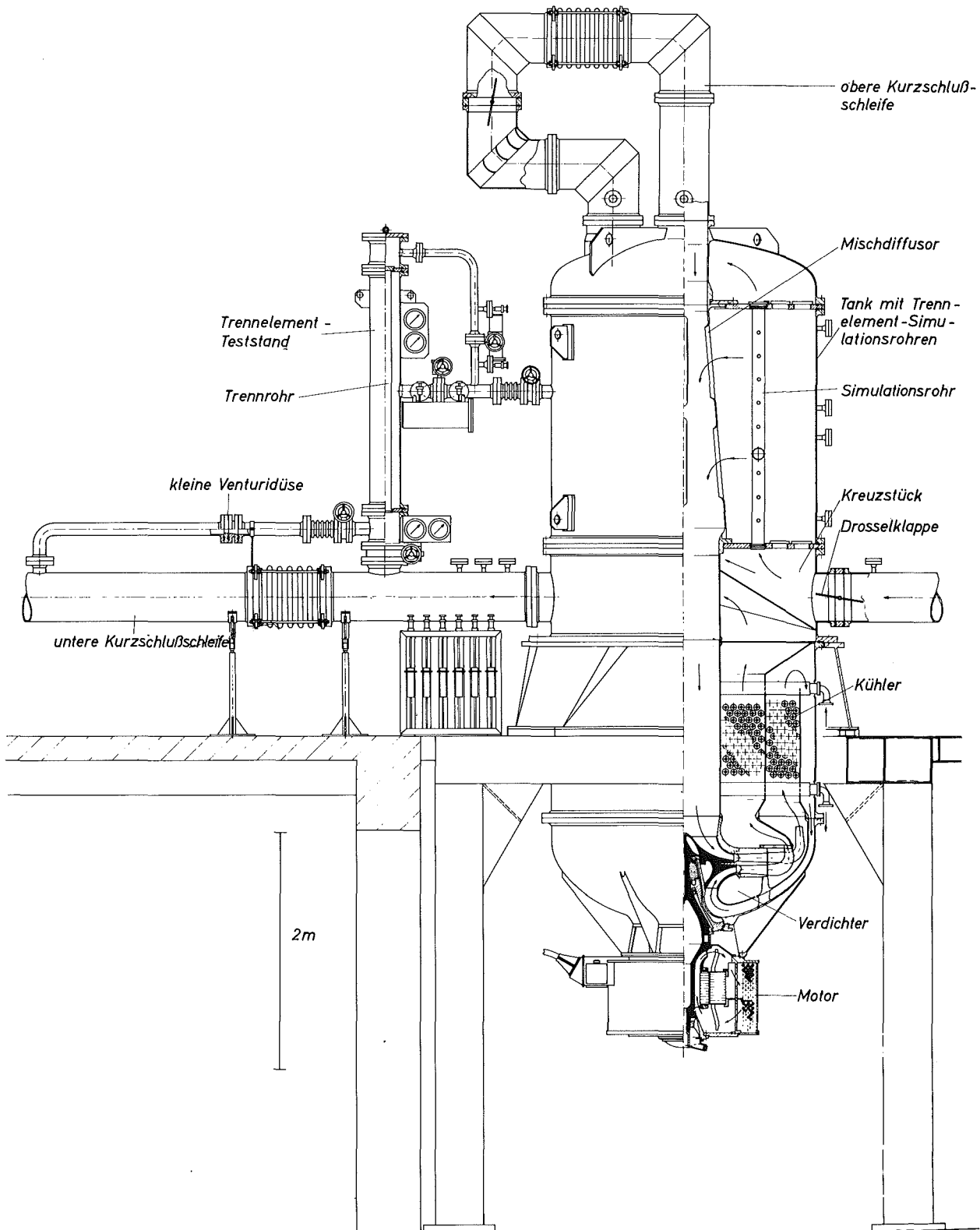


Abb. 2: Längsschnitt durch die Trenndüsenstufe

den Mischdiffusor bzw. die obere Kurzschlußschleife dem zentralen Ansaugrohr des Verdichters wieder zugeführt.

Der zweistufige Radialverdichter besitzt ein fliegend gelagertes back on back-Rad mit radialendenden Beschaufelungen. Um das Laufrad herum angeordnet sind Ringe mit konischen Diffusorkanälen, die durch nach oben abgewinkelte, trompetenähnliche Ausblasestutzen fortgesetzt werden.

Die 1. Stufe saugt das Verfahrensgas über das Zentralrohr an, komprimiert es und führt es durch die zwanzig Diffusorkanäle und die nachgeschalteten Ausblasestutzen dem Zwischenkühler zu. Über den äußeren konzentrischen Ringraum saugt die zweite Stufe das gekühlte Gas an. Die der zweiten Stufe nachgeschalteten Ausblasestutzen sorgen für die durch die integrierte Bauweise bedingte Überkreuzung der beiden Gasströme, so daß das Gas zu dem innen liegenden Endkühler gelangt. Die Wellenhälften von Verdichter und Motor sind starr miteinander gekuppelt, wodurch eine Lagerung zwischen Motor und Verdichter entfällt. Axial wird diese Welle fixiert durch ein kombiniertes Trag- und Führungslager im Verdichter. Das zweite Führungslager ist im Motor angeordnet.

Die vakuumdichte Durchführung der Welle vom Verdichterrad im Verfahrensraum zu den Lagern und dem Motor auf der Atmosphärenseite wird durch die Kombination zweier auf radialen Flächen dichtender Gleitringe erreicht, wobei die ölgesperrte Gleitringdichtung die Trennung von Atmosphärendruck und Verfahrensdruck bewirkt und die gasgesperrte Gleitringdichtung den mit Öldampf verunreinigten Zwischenraum vom Verfahrensraum trennt.

Der Verdichter besitzt außerdem eine Stillstandsichtung, die in Betriebspausen die Absperrung des Verfahrensraumes gegen die Sperrgasdichtung und die dahinter liegenden Räume

übernimmt. Dadurch ist eine Demontage der Welle mit Lagern und Dichtungen ohne Belüftung des Verfahrensraumes möglich.

Zum Testen von einzelnen technischen Trennrohren steht ein Teststand zur Verfügung, der parallel zum Tank geschaltet ist (siehe Abb. 2). Das zur Versorgung des Trennrohres benötigte Ausgangsgas wird aus der unteren Kurzschlußschleife entnommen und über eine kleine Venturidüse dem Trennrohr von unten zugeführt. Die beiden getrennten Fraktionen werden einzeln abgesaugt und vor der Einführung in den Tank wieder vermischt.

Wegen der Korrosionsgefahr durch das UF_6 wurde die Stufe weitgehend aus der Aluminium-Magnesiumlegierung AlMg 3 gefertigt.

Abb. 3 zeigt eine Ansicht der Trenndüsenstufe.

2.2 Beschreibung der Hilfseinrichtungen

Die im folgenden beschriebenen Hilfseinrichtungen sind in schematischer Darstellung in Abb. 4 zusammengefaßt. Für die Rückkühlung des Kühlwassers aus den Verfahrensgaskühlern, den Motorkühlern und dem Schmierölkühler wurde über Dach ein zwangsbelüfteter Verdunstungskühlturm⁸⁾ installiert mit einem auf vier Drehzahlen umschaltbaren Ventilator. Die Regelung der Vorlauftemperatur geschieht durch ein elektromotorisch angetriebenes Beimischventil zwischen Rücklauf- und Vorlaufstrang und -bei Erreichen der oberen oder unteren Grenze des Ventil-Stellbereichs- durch Umschaltung der Ventilatorumdrehzahl.

Für die Schmierung und Kühlung der beiden Gleitlager der Verdichter-Motorwelle und der ölgesperreten Gleitringdich-

8) Hersteller: Kraftanlagen Heidelberg

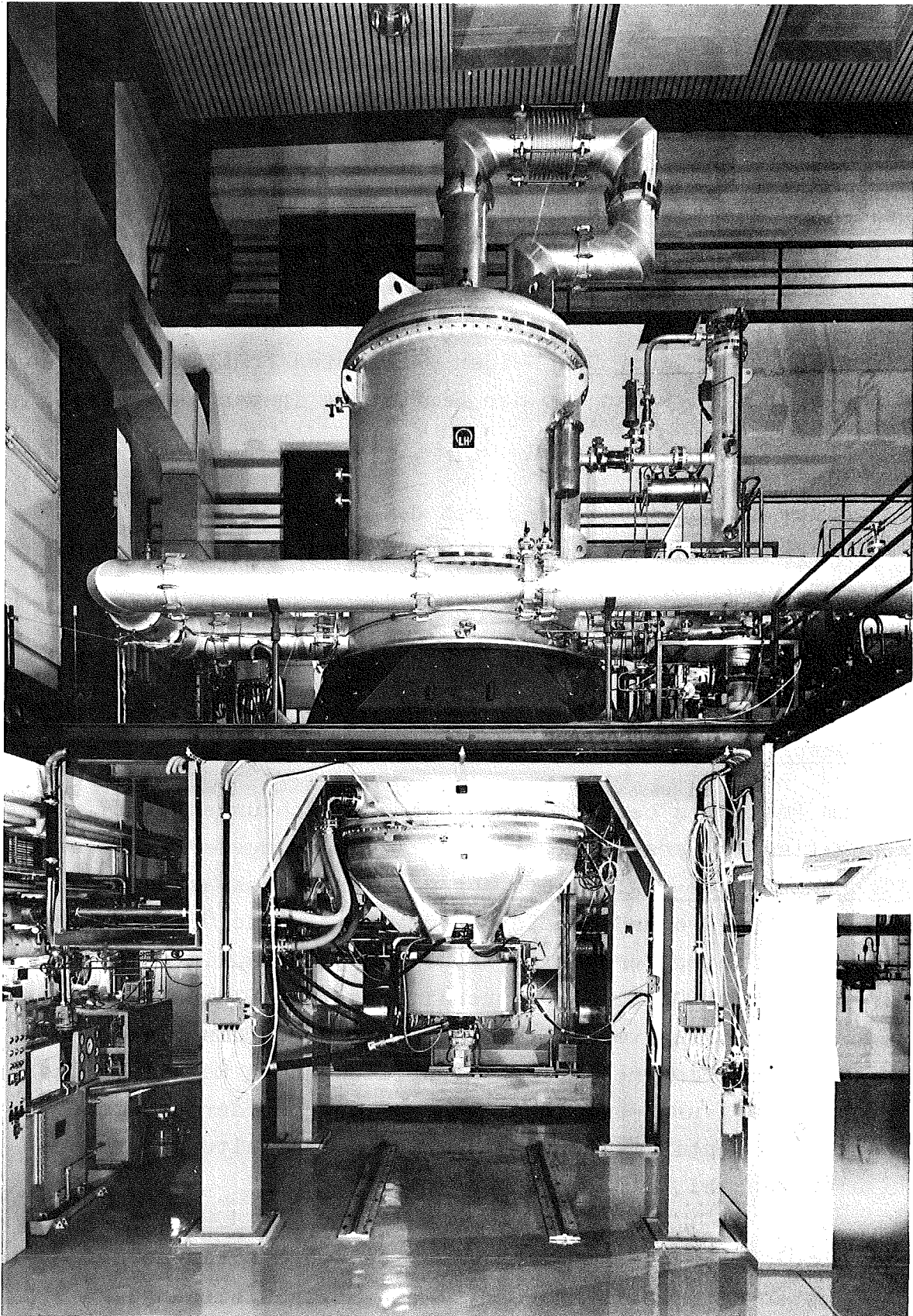


Abb. 3: Ansicht der Trenndüsenstufe

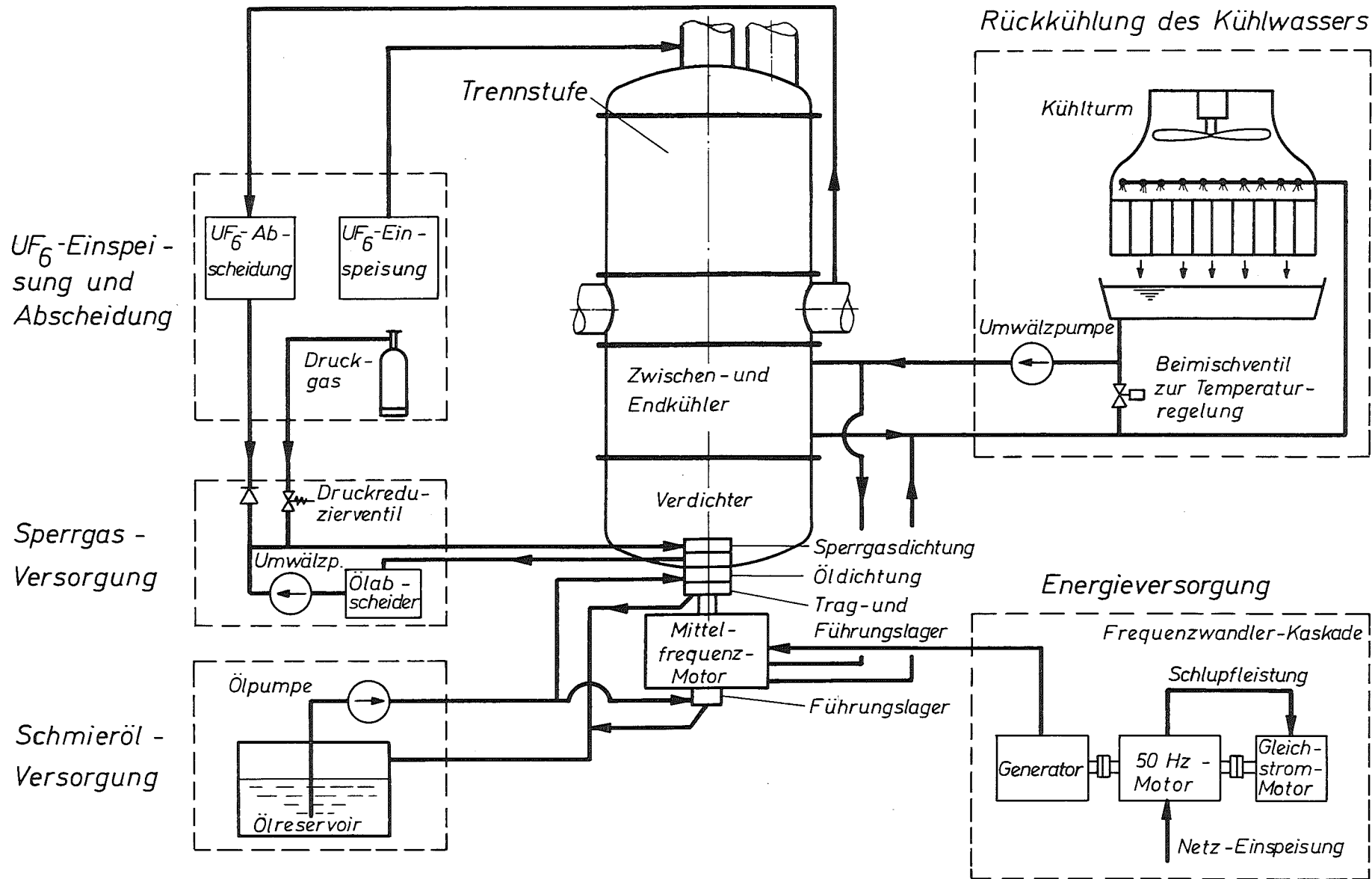


Abb. 4: Schematische Darstellung der Hilfseinrichtungen

tung ist eine Schmierölversorgung vorhanden. Bei Stromausfall übernimmt eine batteriegespeiste Notpumpe die Versorgung während des Auslaufs des Verdichters.

Die UF₆-Einspeisung und -Abscheidung dient beim Füllen zur Einspeisung des UF₆ in den Verfahrensraum und beim Entleeren zur Abtrennung des UF₆-Anteils aus dem Verfahrensgas. Während des Betriebs versorgt die UF₆-Abscheidungsanlage die gasgesperrte Wellendichtung des Verdichters mit Sperrgas von der Hochdruckseite des Verfahrenskreislaufs. Das entnommene Verfahrensgas wird von UF₆ befreit, damit nach der Sperrung auf der Ölseite der Gasdichtung keine Reaktion von UF₆ mit dem dort vorhandenen Lecköl aus der ölgesperrten Gleitringdichtung stattfinden kann. Da die Wellendichtung zwischen der ersten und der zweiten Stufe liegt, gewährleistet bei Normalbetrieb die Druckerhöhung in der zweiten Stufe eine ausreichende Versorgung der gasgesperrten Wellendichtung. Bei Teillastbetrieb wird das Sperrgas aus einer Druckgasflasche entnommen⁹⁾. Zur Abtrennung des UF₆-Anteils stehen vier Abscheider in Tauchrohr-Konstruktion mit Maschendraht-Füllkörpern zur Verfügung, von denen jeweils einer für den Abscheidvorgang mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Durch kontinuierliche Anhebung der Kühlzone wird der Abscheiderringraum gleichmäßig mit festem UF₆ beladen. Nach 24 Betriebsstunden wird dann auf den nächsten Abscheider umgeschaltet. Das so gereinigte Zusatzgas passiert einen nachgeschalteten, ebenfalls stickstoffgekühlten Sicherheitsabscheider und wird dann über die Sperrgasversorgung der Wellendichtung zugeführt. Das bei diesem Vorgang dem Verfahrenskreislauf entzogene UF₆ muß, um die Konzentration aufrechtzuerhalten, kontinuierlich in gleicher Menge aus einem anderen zuvor aufgetauten und mit einem Warmluftgebläse beheizten Abscheider in den Kreislauf gasförmig eingespeist werden.

9) Bei Betrieb einer technischen Trenndüsenanlage wird das in den einzelnen Stufen eingespeiste Sperrgas am Kopf der Kaskade durch die für den Anreicherungsbetrieb ohnehin erforderliche UF₆-Abscheidungsanlage bereitgestellt.

Die notwendige Trennung von Verfahrensraum und Ölraum durch die gasgesperrte Wellendichtung wird durch die Aufteilung des eintretenden Sperrgasstroms zum Verfahrenskreislauf hin und zur ölgesperrten Gleitringdichtung hin erreicht. Die wesentliche Aufgabe der Sperrgasversorgung ist, diesen letzten Teilstrom, der durch Öldämpfe verunreinigt wird, für die Sperrung wieder nutzbar zu machen. In einer Tieftemperatur-Kühlfalle wird das Sperrgas von den Ölverunreinigungen befreit und in einem Aktivkohlefilter nachgereinigt. Eine Membranpumpe verdichtet den Teilstrom wieder auf den Vordruck der gasgesperrten Wellendichtung, wonach er -gemeinsam mit dem Sperrgasstrom aus der UF_6 -Abscheidungsanlage- der Dichtung wieder zugeführt wird.

Die Energieversorgung des Verdichter-Antriebsmotors wird von einem regelbaren rotierenden Frequenzwandler⁷⁾ übernommen, der eine Drehzahlregelung des Verdichters zwischen 7000 und 9000 U/min ermöglicht.

2.3 Beschreibung der Meßeinrichtungen

Für die Druckmessung werden fast ausschließlich elektrische Druckaufnehmer¹⁰⁾ verwendet, bei denen die Verformung einer dünnen Edelstahl-Membrane durch eine Widerstands-Vollbrücke in eine Spannung umgeformt wird. Daneben werden für die Anzeige vor Ort Kapselfedermanometer¹¹⁾ eingesetzt. Für die Differenzdruckmessung werden Geräte mit einer Faltenbalgkonstruktion und elektrischem Ausgang verwendet¹²⁾. Die Temperaturen im Verfahrensgas und im Kühlwasser werden mit Widerstands-Temperaturfühlern¹³⁾ gemessen. Die Temperaturfühler im UF_6 sind durch Edelstahlhülsen geschützt. Daneben werden zusätzlich noch Thermoelementfühler¹⁴⁾ eingesetzt.

10) Hersteller: Fa. Bell & Howell, Pasadena (USA) Typen 4-327 und 4-366

11) Hersteller: Appleby & Ireland, Basingstoke (England), Typ AI101

12) Hersteller: Fa. Hartmann & Braun A.G. Frankfurt/M., Typ TVE

13) Hersteller: Fa. Degussa, Hanau

14) Hersteller: Philips, Mantelthermoelemente

Zur Messung des Verdichterdurchsatzes wird eine Norm-Venturidüse¹⁵⁾ in der unteren Kurzschlußschleife verwendet.

Zur Messung der UF_6 -Konzentration im Helium wird ein akustischer Gasanalysator¹⁶⁾ eingesetzt. Das Meßprinzip beruht auf der Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz einer Lippenpfeife von der Schallgeschwindigkeit des schwingenden Gasmediums. Die Schallgeschwindigkeit ihrerseits hängt von der Gasart bzw. der Zusammensetzung des Gasgemisches ab. Bei einem binären Gasgemisch liefert die gemessene Tonfrequenz eine direkte Aussage über das Mischungsverhältnis der beiden Gaskomponenten. In die Schwingungsfrequenz geht weiterhin die akustische Länge der Lippenpfeife ein, die mit der geometrischen Länge nicht genau übereinstimmt und deshalb mit einem reinen Gas experimentell bestimmt werden muß. Aus der so ermittelten akustischen Länge und den Stoffwerten der beiden Gemischkomponenten wird die Zuordnung von Frequenz und UF_6 -Konzentration rechnerisch bestimmt. Vergleichsmessungen mit Eichgemischen bestätigten die gerechnete Eichkurve im Rahmen der Genauigkeit, mit der die Partialdrucke der Gemischkomponenten beim Ansetzen gemessen werden konnten (siehe Abb. 5). Wiederholte Überprüfungen mit Reingasen zeigten eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Meßwerte des akustischen Gasanalysators über lange Zeiträume hinweg.

Die Verdichterdrehzahl wird mit einem induktiven Aufnehmer an der Wellenverbindung zwischen Verdichter und Motor gemessen und auf einem elektronischen Zähler angezeigt. Die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichter-Motors wird nach der 2-Wattmeter-Methode gemessen und auf 2 Präzisions-Leistungsmessgeräten angezeigt. Daneben werden Wirk- und Blindleistung auf einem Linienschreiber mit geringerer Genauigkeit registriert.

15) Auslegung nach VDI-Durchflußregeln DIN 1952, Ausgabe Nov. 48 und Mai 69. In Abb. 2 durch Kreuzstück verdeckt.

16) Hersteller: Hispano-Suiza, Paris.

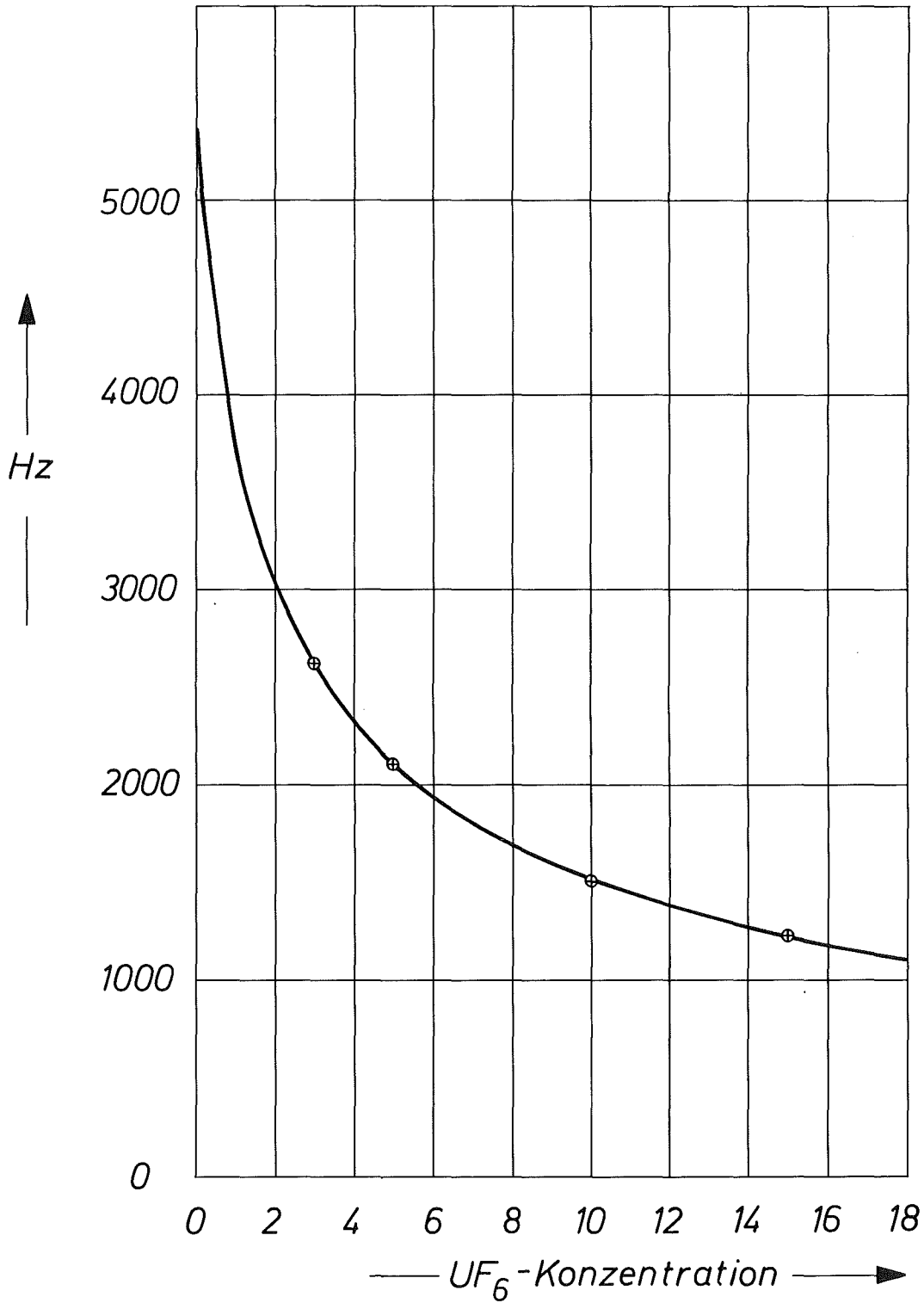


Abb. 5: Vergleich der für UF_6 /Helium-Gemisch berechneten Schwingungsfrequenzen des akustischen Gasanalysators mit den bei Eichmessungen erzielten experimentellen Werten. Bei 300 bis 400 Torr Eingangsdruck und Expansionsverhältnis >4 .

Alle elektrischen Meßsignale (mit Ausnahme der Motorleistung und der Frequenz des Konzentrations-Meßgerätes) werden in einer schallgedämmten Meßwarte zentral registriert¹⁷⁾.

2.4 Versuchsvorbereitung

Zum Erreichen der geforderten hohen Dichtheit wurden alle medienberührten Bauteile vor der Endmontage beim Hersteller und nach dem Zusammenbau am Aufstellungsort an den Montageverbindungen einem Helium-Lecktest unterzogen. Die tolerierte maximale Gesamtleckrate von $1 \cdot 10^{-4}$ Torr·l/s wurde bei einer anschließenden Druckanstiegsmessung der evakuierten Stufe deutlich unterschritten. Vor der Inbetriebnahme der Stufe mit UF_6/He -Gemisch wurde zunächst eine Funktionsprüfung aller Komponenten und Hilfseinrichtungen mit einem einfach zu handhabenden N_2/He -Vergleichsgas durchgeführt. Zur Herabsetzung der UF_6 -Verluste, die durch Umsetzung mit auf den Wänden adsorbierten Feuchtigkeitsresten und den Wandmaterialien selbst entstehen, wurde vor der ersten Füllung der Stufe mit Verfahrensgas zunächst eine Trocknung und Passivierung mit SF_4 vorgenommen¹⁸⁾. Die so vorbereitete und evakuierte Stufe wurde dann mit Verfahrensgas gefüllt, wobei zunächst aus einem Vorratsbehälter in der UF_6 -Einspeisung UF_6 und anschließend Helium eingelassen wurde. Das gewünschte Mischungsverhältnis wurde durch Messung der temperaturkorrigierten Anlagendrucke eingestellt. Nach Einschalten des Verdichters wurde das Gemisch rasch homogenisiert und konnte dann laufend mit dem akustischen Gasanalysator auf seinen UF_6 -Gehalt hin kontrolliert werden, wobei nur noch kleine Korrekturen notwendig waren.

17) Hersteller der Meßwerterfassung: Hartmann & Braun A.G. Frankfurt/M.

18) Bei einer späteren Neufüllung der zwischendurch belüfteten Anlage wurde die Passivierung versuchsweise mit Fluor durchgeführt. In beiden Fällen ergab sich eine Verminderung der anfänglichen UF_6 -Verlustrate gegenüber der unbehandelten Oberfläche auf etwa die Hälfte.

Zur Konzentrationserhöhung wurde UF_6 aus auf 50°C erwärmten Vorratsbehältern der UF_6 -Abscheidung gegen den Druck im Verfahrenskreislauf eingespeist. Zur Konzentrationsabsenkung wurde bei laufendem Verdichter unter Ausnutzung des Druckgefälles zwischen Hoch- und Niederdruckseite kurzzeitig ein Teilstrom des Verfahrensgases über einen Abscheider der UF_6 -Abscheidung geleitet und der darin enthaltene UF_6 -Anteil ausgefroren.

3. Experimente

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Für die Bestimmung der Betriebsgrenzen der Trennstufe müssen das Verdichterkennfeld und die Druckabhängigkeit der Durchflußziffer des Trennelementtanks bekannt sein. Da die technischen Trennelemente sich noch in der Entwicklung befinden und beim Übergang zu anderen Trennelementtypen mit Änderungen der Durchsatzcharakteristik gerechnet werden muß, ist es vorteilhaft, Verdichterkennfeld und Trenntankcharakteristik unabhängig voneinander zu ermitteln. Für die Bestimmung des Verdichterkennfeldes wurde der Trenntank mit 20 Rohren bestückt, die durch gleichmäßig verteilte Bohrungen am Umfang und an der oberen Stirnfläche eine weitgehende Simulation der in den Trennröhren vorhandenen Strömungswiderstände mit Ausnahme der Druckabhängigkeit der Durchflußziffer ermöglichten. Gegenüber der Verwendung der Drosselklappe zur Erzeugung des Strömungswiderstandes haben die Rohre den Vorteil, daß sie die Strömungsverhältnisse im Verdichtereinlauf besser simulieren.

Da sich der Durchsatz des Trenntanks additiv aus den Durchsätzen der parallel geschalteten Trennröhre zusammensetzt und die Durchsatzcharakteristik der in Serie gefertigten Trennröhre nur in sehr engen Grenzen schwankt, kann die Druckabhängigkeit der Durchflußziffer des Trenntanks auch an einem einzelnen Trennröhr experimentell bestimmt werden. Diese Versuche wurden an einem Trennröhr in dem speziell hierfür vorgesehenen Teststand durchgeführt.

3.2 Das Verdichter kennfeld bei Nenndrehzahl und veränderlicher UF₆-Konzentration

Der Strömungswiderstand der Simulationsrohre wurde an den Durchsatz des Verdichters im Auslegungspunkt in einem Vorversuch angepaßt. Zwischen dem so festgelegten Arbeitspunkt und der Pumpgrenze des Verdichters liegt auch der Arbeitspunkt des Verdichters mit dem entsprechend angepaßten Trenntank. Aus diesem Grund beschränken sich die Versuche zur Ermittlung des Verdichterkennfeldes bei Nenndrehzahl $n = 8600$ U/min auf den Bereich zwischen der Arbeitskennlinie des Verdichters mit den Simulationsrohren und der Pumpgrenze. Die hierzu notwendige Variation des Strömungswiderstandes über den durch die Simulationsrohre vorgegebenen Wert hinaus wurde durch schrittweises Schließen der Drosselklappe in der unteren Kurzschlußschleife ermöglicht.

Diese Maßnahme hat ein Absinken des Verdichterdurchsatzes und ein Ansteigen des Druckverhältnisses zur Folge. Durch die Volumenverhältnisse in der Stufe bedingt, muß zur Konstanthaltung des Gegendruckes P bei jedem Schritt eine geringe Menge der in der Stufe befindlichen Gasfüllung in einen Pufferbehälter weggespeichert werden. In derselben Weise wurde beim schrittweisen Absenken des Gegendruckes von der Möglichkeit, Gemisch im Pufferbehälter zu speichern, Gebrauch gemacht.

Da bei der Fabrikplanung Getriebemotoren mit fester Drehzahl vorgesehen sind, wurde zur Aufnahme des Verdichterkennfeldes die Stufe nur bei Nenndrehzahl $n = 8600$ U/min gefahren.

Die Versuche wurden weiterhin bei konstanter Verdichter-Ansaugtemperatur 35°C ¹⁹⁾ und mit UF₆-Konzentrationen zwischen 3 und

19) Die Ansaugtemperaturen der beiden Verdichterstufen wurden gemeinsam über die Vorlauftemperatur des Kühlwassers geregelt. Kleine Abweichungen der Ansaugtemperatur wurden wegen der mit dieser Methode verbundenen langen Einstellzeiten durch geringe Drehzahländerungen kompensiert. Vergl. hierzu VDI-Richtlinien 2045, Abnahme und Leistungsversuche an Verdichtern, Teil I, April 1967.

7 Mol-% durchgeführt. Zur Aufnahme des Verdichter kennfelds gehört auch die Ermittlung der Pumpgrenze. Eine mehrere Minuten dauernde Meßwertaufnahme direkt an der Pumpgrenze ist wegen des damit verbundenen Risikos für den Verdichter nicht möglich. Deshalb wurde bei allen Meßpunkten auch der Stellwinkel α der Drosselklappe mit aufgenommen. Bei Meßpunkten unmittelbar an der Pumpgrenze genügt dann die Kenntnis von Stellwinkel und Gegendruck, um bei entsprechender Extrapolation des Stellwinkels seine Lage im Kennfeld genau fixieren zu können.

Für die graphische Darstellung der Meßergebnisse wurden die für die spätere Auswertung günstigen Auftragungen Druckverhältnis $\overline{\Pi}$ bzw. Leistungsaufnahme W des Verdichtermotors jeweils über dem Moldurchsatz L gewählt, wobei die Größen L und W auf die Betriebswerte L_A und W_A bei den Auslegungswerten $n_A = 8600$ U/min, $\overline{\Pi}_A = 4$, Gegendruck $P_A = 600$ Torr und der Konzentration $N_A = 5$ Mol-% UF_6 normiert sind.

Abb. 6 zeigt die Verdichter-Kennfelder für UF_6 -Konzentrationen 3,4,5,6 und 7 Mol-% als Abhängigkeit des Druckverhältnisses $\overline{\Pi}$ vom normierten Moldurchsatz L/L_A bei Gegendrücken P zwischen 300 und 600 Torr. Die Diagramme zeigen mit wachsender UF_6 -Konzentration für einen Arbeitspunkt bei festgehaltenem Gegendruck eine Zunahme im Kompressionsverhältnis bei gleichzeitiger Abnahme des Moldurchsatzes.

In einem Kennfeld für konstante UF_6 -Konzentration stellt die Verbindungslinie der Meßpunkte am unteren Ende der Linien konstanten Gegendrucks die Arbeitskennlinie des Verdichters mit den Simulationsrohren dar (Drosselklappe ganz offen). Die obere Verbindungslinie kennzeichnet die Pumpgrenze (Drosselklappe gedrosselt). Eine Drosselung längs einer Linie konstanten Gegendrucks ist mit einer Zunahme des Druckverhältnisses und einer Abnahme des Moldurchsatzes verbunden. Dieser nutzbare Durchsatzbereich zwischen Arbeitskennlinie und Pumpgrenze ist bei 6 und vor allem 4 Mol-% vergleichsweise stark eingeschränkt.

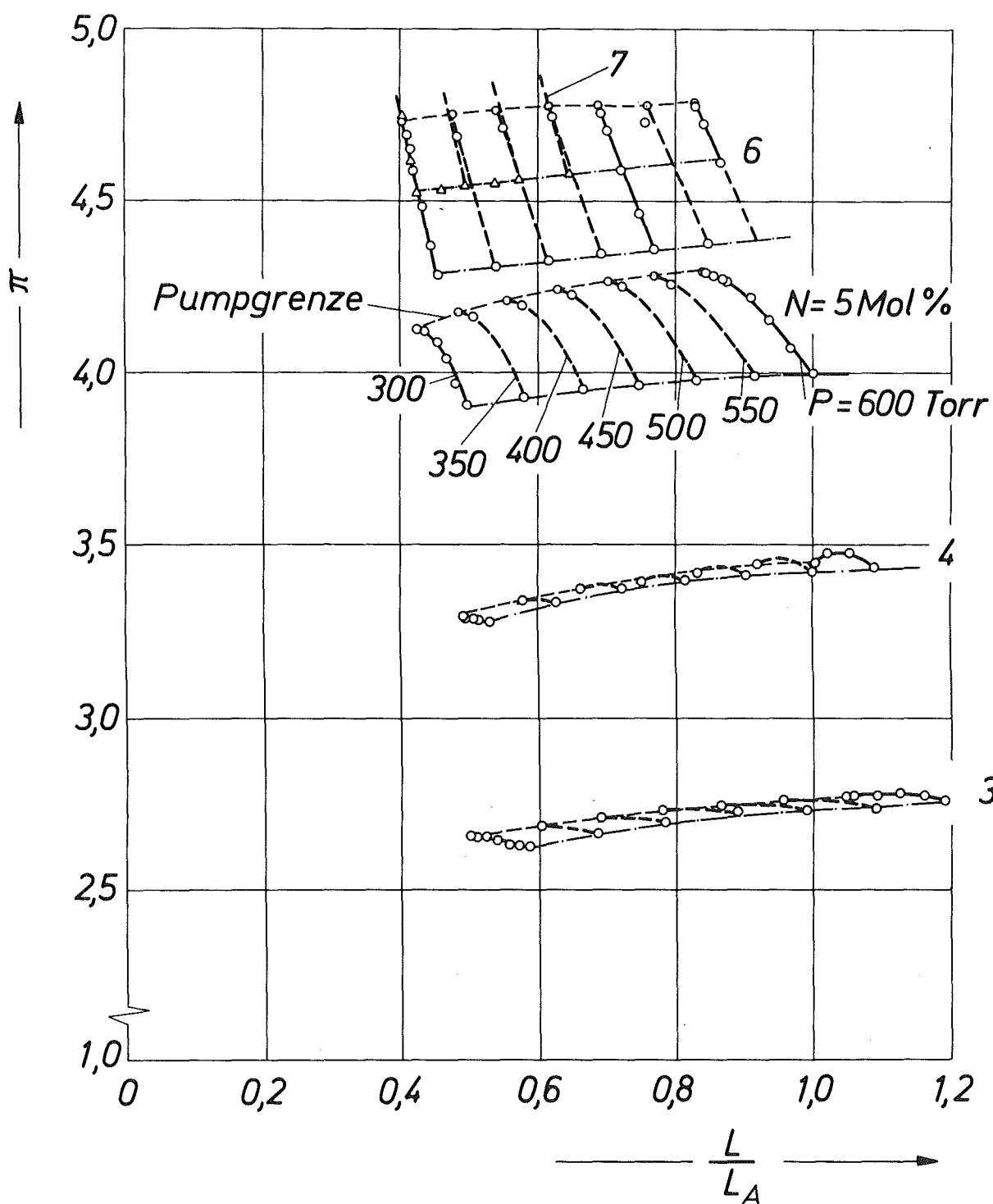


Abb. 6: Abhängigkeit des Druckverhältnisses π des Verdichters vom normierten Moldurchsatz L/L_A für verschiedene Gegendrücke P und UF_6 -Konzentrationen N bei Nenndrehzahl 8600 U/min.

Abb. 7 zeigt die Abhängigkeit der normierten Leistungsaufnahme W/W_A des Verdichtermotors vom normierten Moldurchsatz L/L_A für verschiedene Gegendrücke P und UF_6 -Konzentrationen N .

3.3 Das Verdichter kennfeld bei Nennkonzentration und veränderlicher Drehzahl

Diese Versuche wurden ebenfalls mit den in 3.2 beschriebenen Simulationsrohren durchgeführt. Bei der Nennkonzentration $N_A = 5$ Mol-% wurde die Verdichterdrehzahl zwischen 8700 und 7000 U/min variiert. Zur Vereinfachung des Versuchsbetriebs wurde die bei den Auslegungswerten $\overline{\pi}_A = 4$, $P_A = 600$ Torr, $n_A = 8600$ U/min in der Stufe vorhandene Gasfüllung konstant gelassen.

In Abb. 8 ist das Verdichter kennfeld bei variabler Drehzahl als Abhängigkeit des Druckverhältnisses $\overline{\pi}$ vom normierten Moldurchsatz L/L_A dargestellt. Als zusätzlicher Parameter ist hier der Stellwinkel α der Drosselklappe eingetragen. Es zeigt sich, daß bei Drehzahlen um 8000 U/min der Abstand der Arbeitskennlinie des Verdichters mit den Simulationsrohren von der Pumpgrenze ein Minimum durchläuft.

3.4 Abhängigkeit der Durchflußziffer der Trennelemente vom Druck

Die Versuche zur Bestimmung der druckabhängigen Durchflußziffer eines Trennrohrs wurden jeweils im Anschluß an die Verdichter-Kennfeldversuche mit der in der Stufe vorhandenen Gemischkonzentration durchgeführt. Hierzu wurden lediglich die Absperrventile am Ein- und Austritt des Trennelement-Teststands geöffnet. Versuchsobjekt war ein 2 m langes Trennrohr²⁰⁾, wie es für die später geplante Bestückung des Trenn-

20) Hersteller: Messerschmitt - Bölkow - Blohm, München; Gesamtschlitzlänge 20 m.

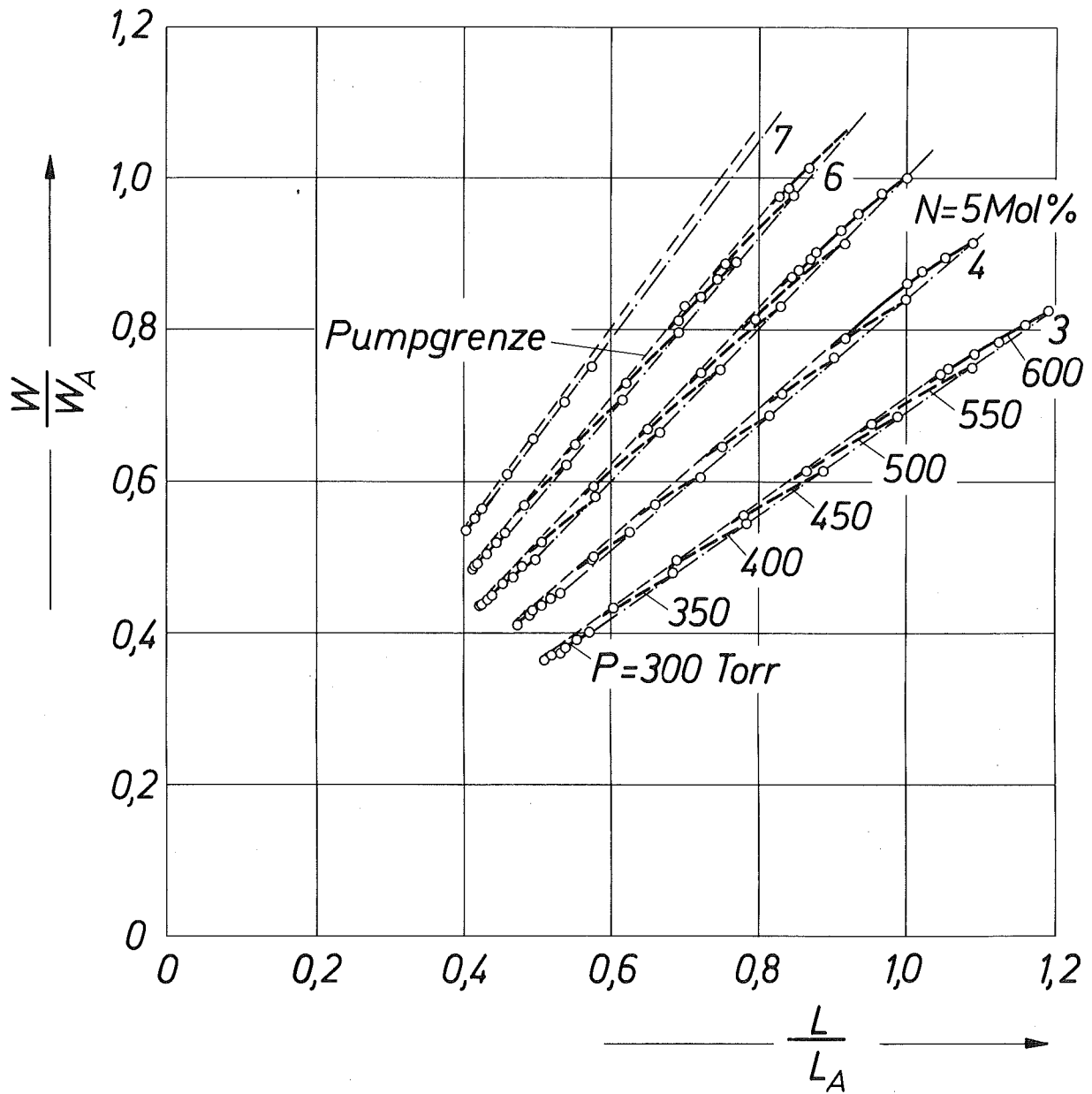


Abb. 7: Abhängigkeit der normierten Leistungsaufnahme $\frac{W}{W_A}$ des Verdichtermotors vom normierten Moldurchsatz $\frac{L}{L_A}$ für verschiedene Gegendrucke P und UF_6 -Konzentrationen N bei Nenndrehzahl 8600 U/min.

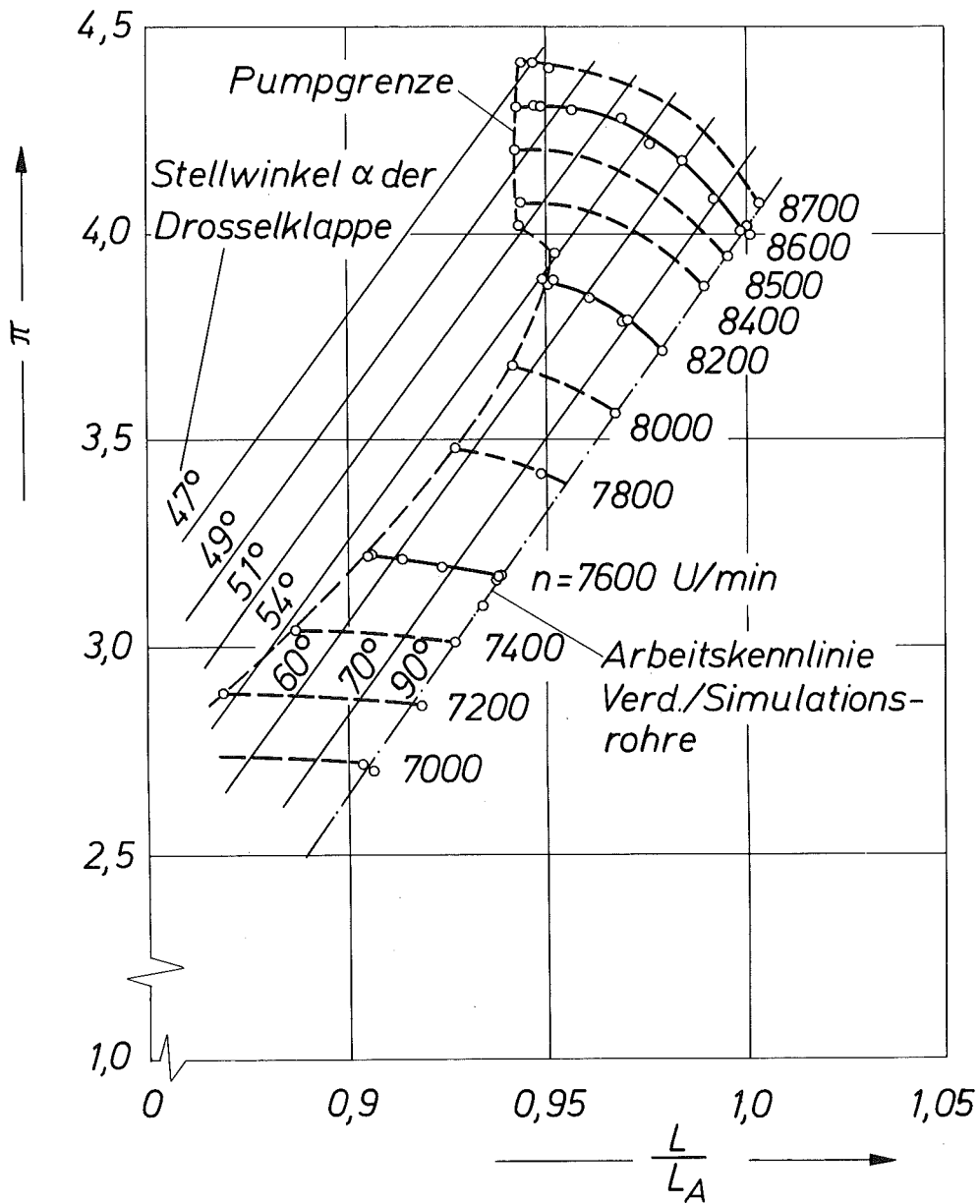


Abb. 8: Abhängigkeit des Druckverhältnisses π des Verdichters vom normierten Moldurchsatz L/L_A für verschiedene Drehzahlen bei $N = 5$ Mol-% UF_6 -Konzentration und konstanter Füllmenge des Kreislaufes.

tanks vorgesehen war. Zur Absenkung des Einlaßdruckes wurde -wie bei den Verdichterkennfeldversuchen- ein Teil des Gasinhalts der Stufe in einem Pufferbehälter gespeichert.

Die Korrektur der Meßergebnisse auf eine konstante Gaseintrittstemperatur von 35°C wurde anhand der aus früheren Messungen ermittelten linearen Abhängigkeit des Moldurchsatzes eines Trennelementes von der absoluten Temperatur durchgeführt.

In Abb. 9 ist die Abhängigkeit des normierten Moldurchsatzes L/L_A des Trennrohrs vom normierten Einlaßdruck P/P_A für verschiedene UF_6 -Konzentrationen N aufgetragen. Einlaßdruck P und Moldurchsatz L sind auf den Auslegungsdruck $P_A = 600$ Torr bzw. auf den hierbei gemessenen Moldurchsatz L_A normiert. Damit gilt das Diagramm in Abb. 9 auch für den mit Trennröhren bestückten Trenntank.

Die gemessene Durchsatzcharakteristik wird in dem untersuchten Druckbereich zwischen 600 und 300 Torr mit guter Näherung durch Geraden wiedergegeben, die mit steigender UF_6 -Konzentration steiler verlaufen und die Ordinate bei geradliniger Verlängerung gemeinsam bei $P/P_A = 0.083$ schneiden²¹⁾. Dies bedeutet eine Abnahme der Durchflußziffer zu niedrigeren Drücken hin, die -wie später gezeigt wird- für die Zusammenschaltung mit dem Verdichter von Bedeutung ist.

21) In dem Druckbereich unter 300 Torr, der bei dem gemessenen Trennrohr durch den Übergang der Kontinuumsströmung in eine molekulare Strömung gekennzeichnet ist, verlaufen die Kurven in Wirklichkeit mit zunehmender Krümmung zum Nullpunkt hin.

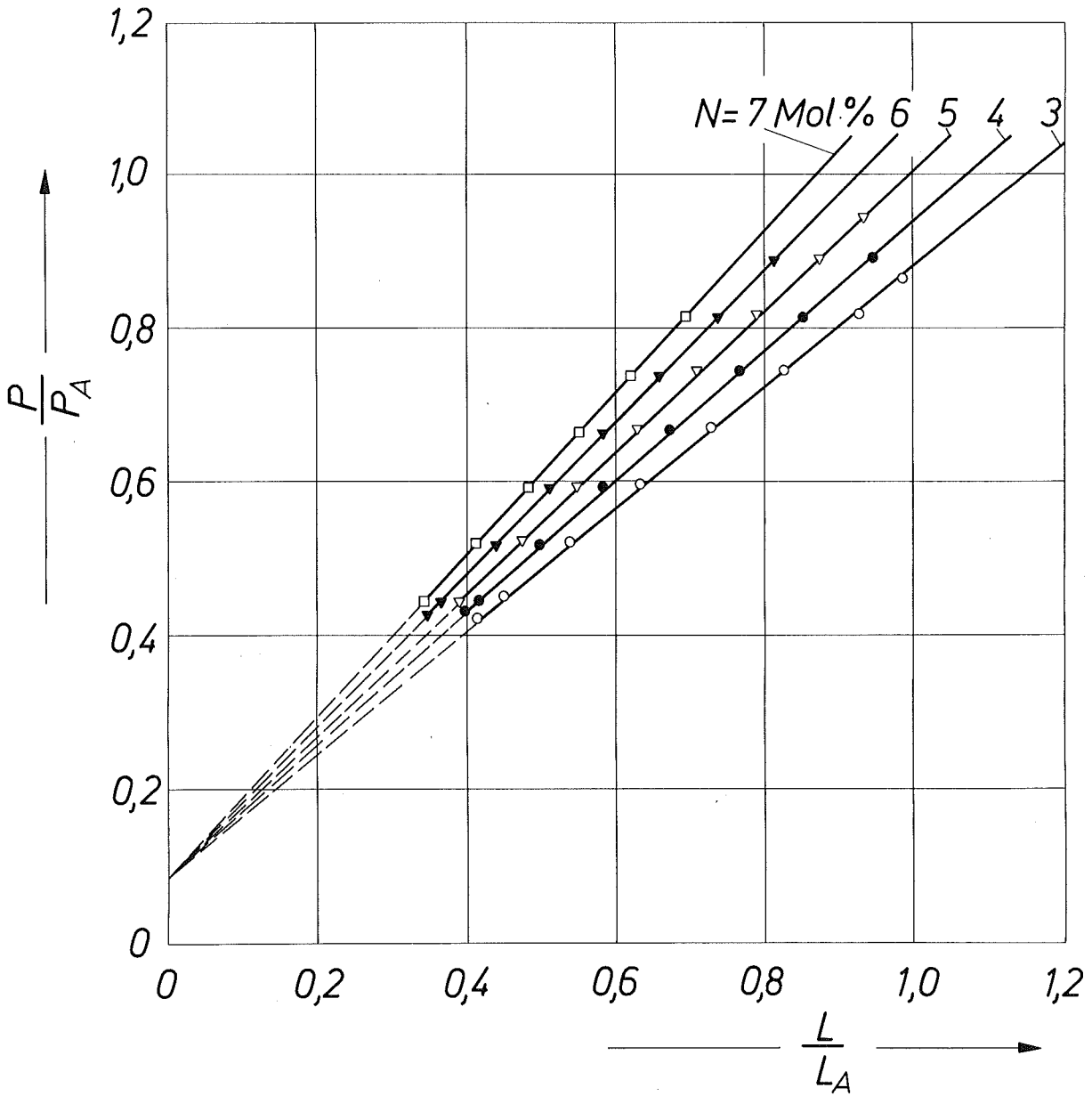


Abb. 9: Abhängigkeit des normierten Moldurchsatzes L/L_A vom normierten Einlaßdruck P/P_A für verschiedene UF_6 -Konzentrationen, gemessen an einem Einzeltrennrohr.

4. Ermittlung der Betriebsgrenzen

Die Betriebsgrenzen einer Trennstufe sind bedingt durch die Stufenkomponenten mit ihren Charakteristiken und Grenzen.

Für den Antriebsmotor liegt eine Begrenzung der Leistungsaufnahme vor, bedingt durch die zulässige Erwärmung, die von der verwendeten Isolationsklasse abhängt. Eine zulässige Überlast von 5 % ist ein bei Motoren dieser Leistungsgröße üblicher Wert, der auch für den Motor der Prototypstufe festgelegt ist.

Für den Verdichter liegt eine Begrenzung durch die Pumpgrenze vor, bei deren Überschreiten durch wiederholte kurzzeitige Umkehr der Strömungsrichtung im Verdichter stoßartige Erschütterungen auftreten, die zu einer Zerstörung des Verdichters führen können. Der Arbeitsbereich des Verdichters wird außerdem begrenzt durch die temperaturabhängige Materialfestigkeit des Laufrades, die eine maximale Gas-Austrittstemperatur von 175°C bedingt. Beim Kühler und beim Trenntank sind innerhalb des hier interessierenden Arbeitsbereiches keine Grenzen vorhanden.

Die für die Ermittlung der Stufengrenzen notwendige Kombination des Verdichter-Kennfeldes mit der Trenntankcharakteristik wird in Abb. 10 für die UF_6 -Konzentration 5 Mol-% gezeigt. Unter der Voraussetzung, daß der Durchsatz des Verdichters und des Trenntanks gleich ist und der Gegendruck des Verdichters gleich dem Einlaßdruck des Trenntanks ist, lassen sich die in Abb. 6 und 7 dargestellten Verdichterkennfelder mit der in Abb. 9 gezeigten Durchsatzcharakteristik des Trenntanks kombinieren.

Das Diagramm in Abb. 10a stellt die in 3.4 erläuterte Druckabhängigkeit des Durchsatzes des Trenntanks dar. Die entsprechenden Kurven für den Verdichter werden durch Übertragen der Abszissenwerte der Kurvenendpunkte für konstanten Gegendruck

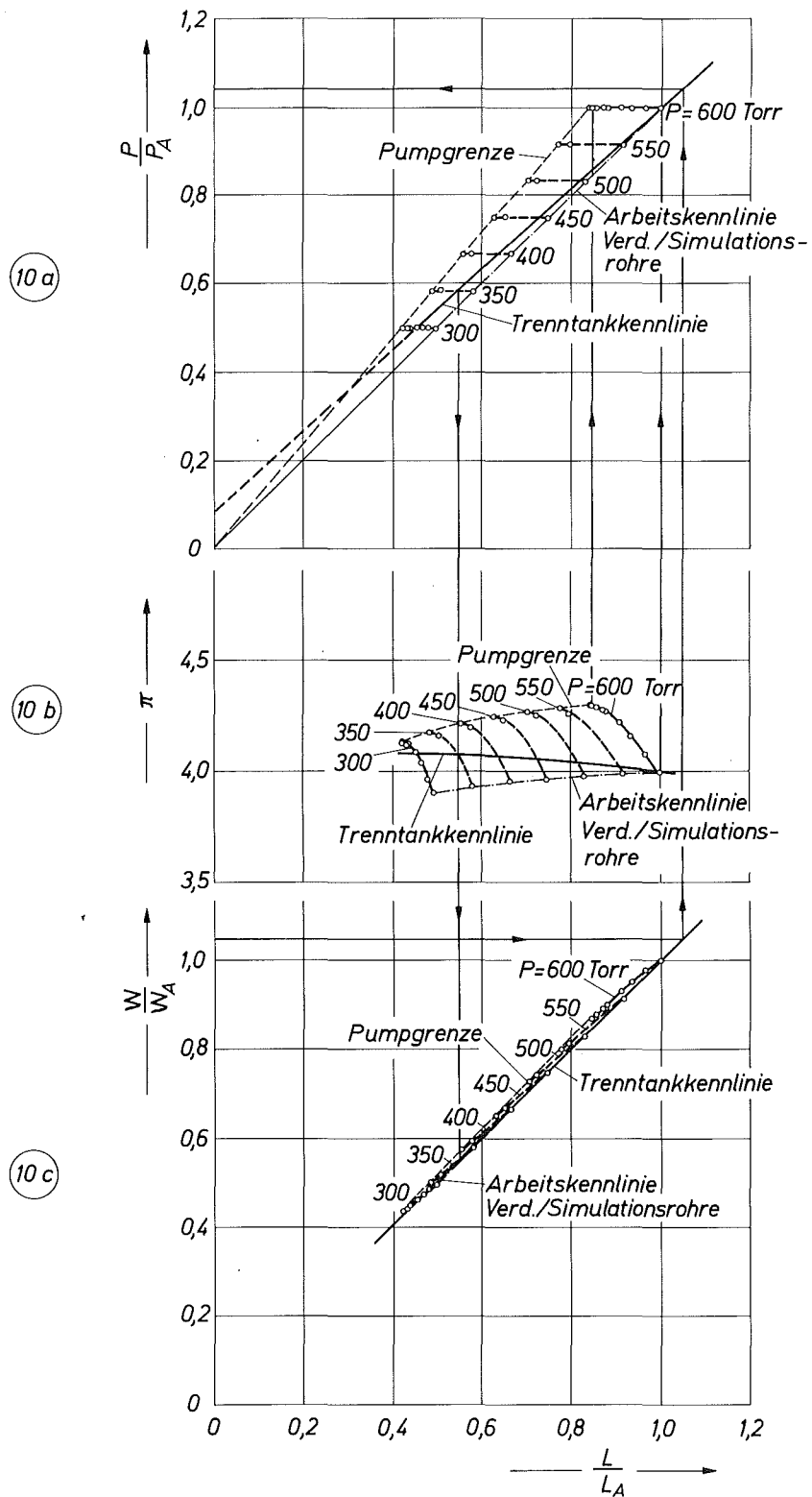


Abb. 10: Kombination des Verdichter-kennfelds mit der Trenntank-characteristik am Beispiel der UF_6 -Konzentration 5 Mol%. Aufgetragen ist der normierte Gegendruck (bzw. Tankvordruck) P/P_A , das Druckverhältnis π und die normierte Verdichtermotorleistung W/W_A jeweils über dem normierten Moldurchsatz L/L_A .

aus dem Verdichter kennfeld in Abb. 10b gewonnen. Durch Übertragen der Schnittpunkte der Trenntank-Kennlinie mit Linien konstanten Gegendrucks aus Abb. 10a auf die entsprechenden Verdichter kennlinien in den Abb. 10b und 10c lassen sich die Trenntank-Kennlinien in den Verdichter-Kennfeldern eintragen. Durch Extrapolation der Pumpgrenze und der Trenntank-Kennlinie in Abb. 10a ergibt sich der kritische Druck, ab dem beim Betrieb der Stufe Pumpen einsetzen würde. Für die Betriebsüberwachung ist es erforderlich, für jeden Betriebszustand einer Stufe ihren Sicherheitsabstand zur Pumpgrenze zu kennen. Dieser Sicherheitsabstand wird nach Abb. 10a durch die geometrische Lage des Betriebspunktes auf der Linie konstanten Gegendrucks zwischen der Arbeitskennlinie der Simulationsrohre und der Pumpgrenze bestimmt, indem die entsprechenden Durchsatzabschnitte ins Verhältnis gesetzt werden. Die Ermittlung der Leistungsgrenze bei 5 % Überlast wird in Abb. 10c gezeigt. Der Schnittpunkt der Trenntank-Kennlinie mit der Leistungslinie 1,05 ergibt den Moldurchsatz, der in Abb. 10a den entsprechenden Druckgrenzwert liefert.

Die Temperaturgrenze von $T_2 = 175^\circ\text{C}$ als maximal zulässige Austrittstemperatur ist mit der Ansaugtemperatur T_1 allgemein gegeben durch

$$\frac{T_2}{T_1} = \overline{\pi}^{\frac{\kappa - 1}{\kappa \cdot \eta_{\text{pol}}}}, \quad (1)$$

also abhängig vom Kompressionsverhältnis $\overline{\pi}$, dem polytropen Verdichtungswirkungsgrad η_{pol} und dem Verhältnis der spezifischen Wärmen $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$. Hochverdichtende radialendende Räder - wie sie hier vorliegen - besitzen längs einer Linie konstanten Gegendrucks ein nahezu konstantes Radgefälle H_{Rad} - was durch Messungen an der 2. Verdichterstufe, siehe Abb. 11, bestätigt wird -, das die Energie für die polytrope Gasver-

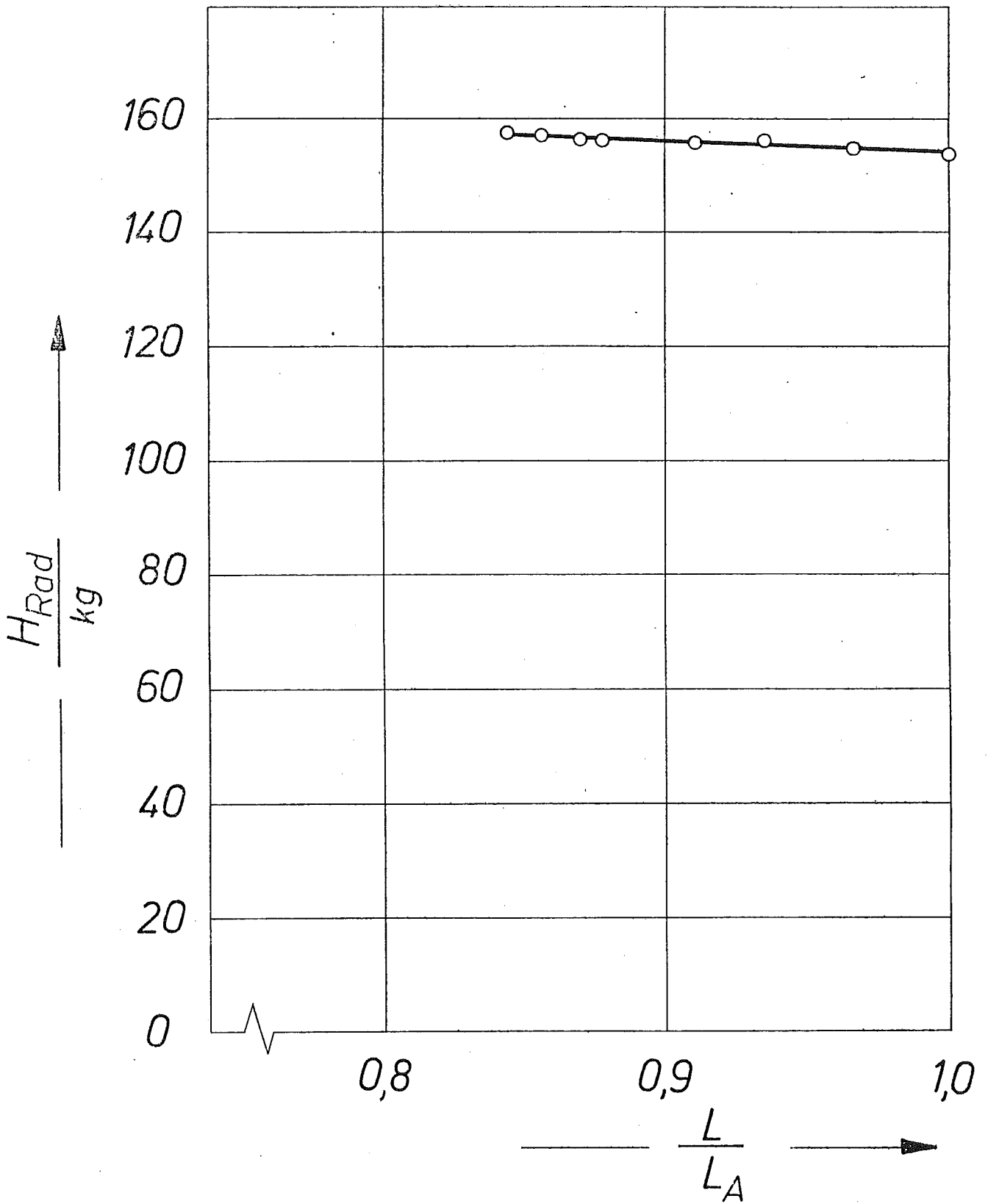


Abb. 11: Verlauf des Radgefälles H_{Rad}/kg über dem normierten Moldurchsatz L/L_A , gemessen an der 2. Stufe des Prototypverdichters.

dichtung liefert:

$$H_{\text{Rad}} \cdot \eta_{\text{pol}} = H_{\text{pol}} = c_p \cdot T_1 \cdot \eta_{\text{pol}} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa \cdot \eta_{\text{pol}}} - 1 \right) \quad (2)$$

Mit Gleichung (1) folgt daraus

$$H_{\text{Rad}} = c_p \cdot T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \quad (3)$$

oder

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{H_{\text{Rad}}}{c_p} = \frac{\text{konst}}{c_p} \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) geht hervor, daß bei konstantem Radgefälle die Temperaturerhöhung nur noch von den Eigenschaften des Verfahrensgases, d.h. von der UF_6 -Konzentration abhängt. Bei 35°C Ansaugtemperatur und 175°C Verdichtungstemperatur ergibt sich eine zulässige Temperaturerhöhung von $\Delta T = 175^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C} = 140^\circ$. Daraus errechnet sich mit dem Radgefälle H_{Rad} des Verdichters bei 8600 U/min eine maximale UF_6 -Konzentration von 6,2 Mol-%. Die Lage der Temperaturgrenze in einem Betriebsdiagramm deckt sich also mit der Konzentrationslinie 6,2 Mol-%.

Eine übersichtliche Darstellung des Betriebsverhaltens und der Grenzen einer Stufe -wie sie sich entsprechend dem Beispiel der Abb. 10a, b und c ermitteln lassen- ist in einem Betriebsdiagramm möglich, das in der Auftragung $\overline{\overline{P/P_A}}$ über P/P_A und mit der Gasgemischkonzentration N als Parameter alle Betriebspunkte und die Betriebsgrenzen einer Stufe enthält (siehe Abb. 12). Die Betriebspunkte für 7 Mol-% wurden wegen der Temperaturgrenze durch Extrapolation ermittelt. Für den sicheren Betrieb der Stufe ist ein Mindestabstand von der Pumpgrenze erforderlich, da beim An- und Abfahren des Ver-

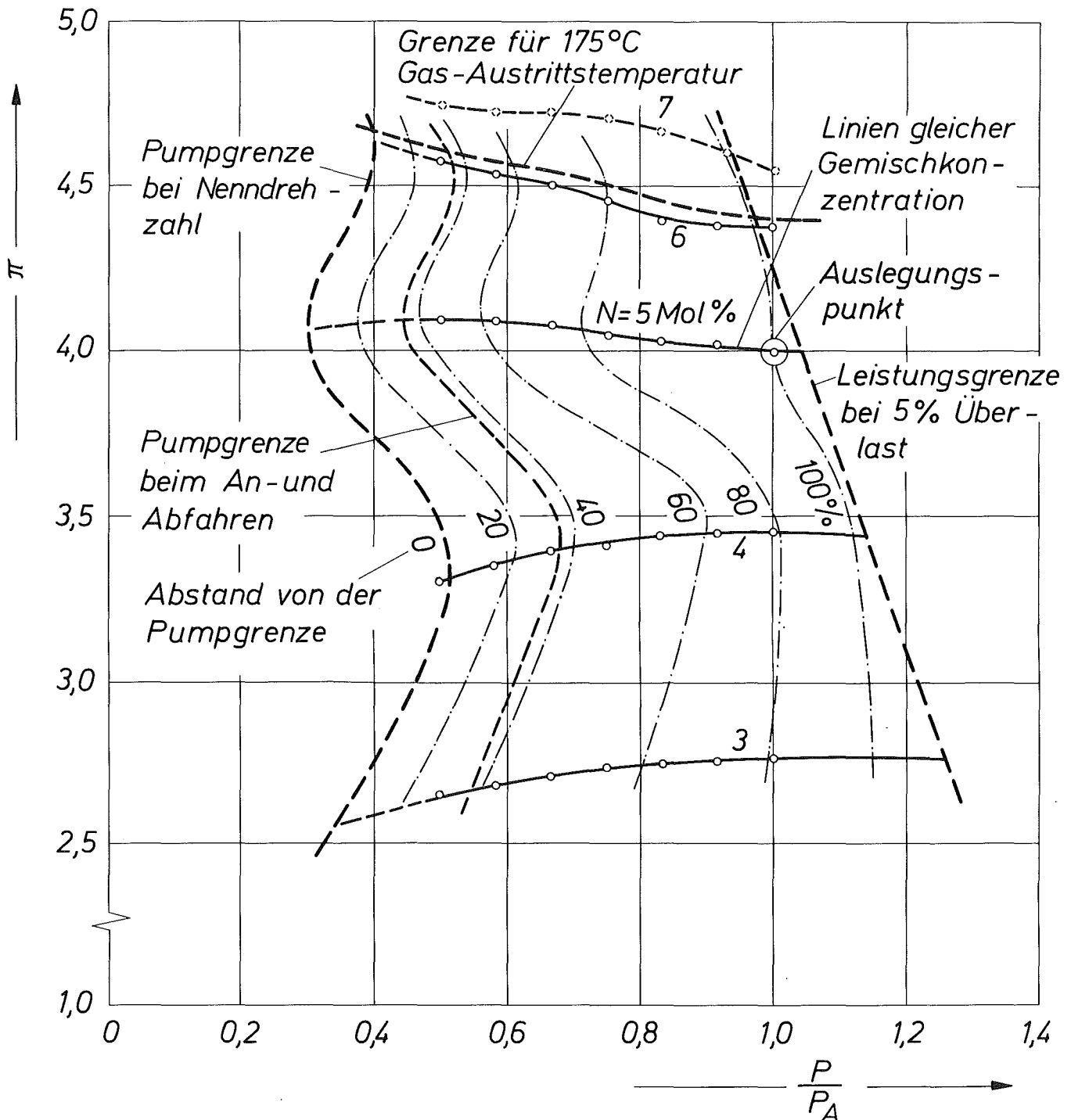


Abb. 12: Betriebsdiagramm der Stufe. Aufgetragen Druckverhältnis des Verdichters π über dem auf $P_A=600$ Torr reduzierten Gegendruck des Verdichters (bzw. Einlaßdruck des Trenntanks) P/P_A bei der Nenndrehzahl $n_A = 8600$ U/min und einer Arbeitstemperatur von 35°C .

dichters bei Drehzahlen um 8000 U/min sich der Abstand des instationären Arbeitspunktes von der Pumpgrenze erheblich verkleinert (siehe Abb. 8). So besitzt ein Betriebspunkt bei 8000 U/min nur noch einen Sicherheitsabstand zur Pumpgrenze von 65 % gegenüber 100 % bei 8600 U/min. Da in einer Trennfabrik Notabschaltungen nicht auszuschließen sind, ist in dem Betriebsdiagramm (Abb. 12) bei 35 % Pumpgrenzabstand die Pumpgrenze beim An- und Abfahren eingetragen. Dieser Pumpgrenzabstand darf deshalb im stationären Betrieb nicht unterschritten werden.

5. Diskussion der Ergebnisse

Das Betriebsdiagramm in Abb. 12 zeigt, daß vom Auslegungspunkt ausgehend durch Konzentrationsänderungen sich der Abstand zur Pumpgrenze hin nur geringfügig ändert. Dieses Verhalten ist auf die sowohl beim Verdichter (Abb. 6) als auch beim Trenntank (Abb. 9) gemessene Zunahme des Moldurchsatzes mit fallender UF_6 -Konzentration zurückzuführen.

Der bei abgesenkten Drücken im Konzentrationsbereich von 6 und vor allem 4 Mol-% stärker verminderte Abstand zur Pumpgrenze ist auf die konzentrationsbedingte Einengung des Betriebsbereichs des Verdichters zurückzuführen, die auch in den Kennfeldern der Abb. 6 zu erkennen ist.

Da die Leistungsgrenze des Verdichtermotors in der Nähe des Auslegungspunktes liegt und schon bei geringen Druck- und/oder Konzentrationssteigerungen erreicht wird, erscheint die Einplanung einer größeren Leistungsreserve für den Verdichtermotor in der Fabrik erforderlich. Allerdings ist an der Leistungsgrenze bei kurzzeitigen Überschreitungen keine Gefährdung zu erwarten, da bedingt durch die großen Massen des Motors eine relativ große Zeitkonstante vorhanden ist. Versuche mit dem Prototypmotor ergaben, daß die Temperaturänderung bei einer 5 %igen Leistungsänderung mit einer Halbwertszeit von ca. 12 Minuten verläuft.

Die Grenze für die Austrittstemperatur des Gases darf dagegen auch kurzzeitig nicht überschritten werden, da -bedingt durch die relativ kleine Masse und die hohe Wärmeleitfähigkeit des Laufrades- mit dem durch den hohen Gasdurchsatz verbundenen hohen Enthalpiestrom eine Zeitkonstante von nur wenigen Sekunden zu erwarten ist.

Bei den Auslegungs-Betriebsbedingungen liegt eine bestimmte Kombination der in Abb. 12 aufgetragenen Größen Vordruck P , Druckverhältnis $\overline{\Pi}$ und UF_6 -Konzentration N vor. Die Auslegungs-Betriebsbedingungen ergeben daher im Betriebsdiagramm einen ganz bestimmten Punkt (den Auslegungspunkt in Abb. 12). Abweichungen von den Auslegungs-Betriebsbedingungen können sowohl durch falsche Einstellung von P und N als auch durch Veränderungen der Komponentencharakteristiken gegenüber deren Auslegungswerten bedingt sein (z.B. teilweise Verstopfung von Trennelementen). Im ersten Fall ergeben die Kombination der drei Betriebsbedingungen wieder einen Punkt in dem mit den auslegungsgemäßen Komponenten ermittelten Betriebsdiagramm (Abb. 12). Im zweiten Fall im allgemeinen nicht. Veränderungen der Komponentencharakteristiken lassen sich daher anhand des Betriebsdiagramms auch außerhalb des Auslegungspunktes erkennen.

