

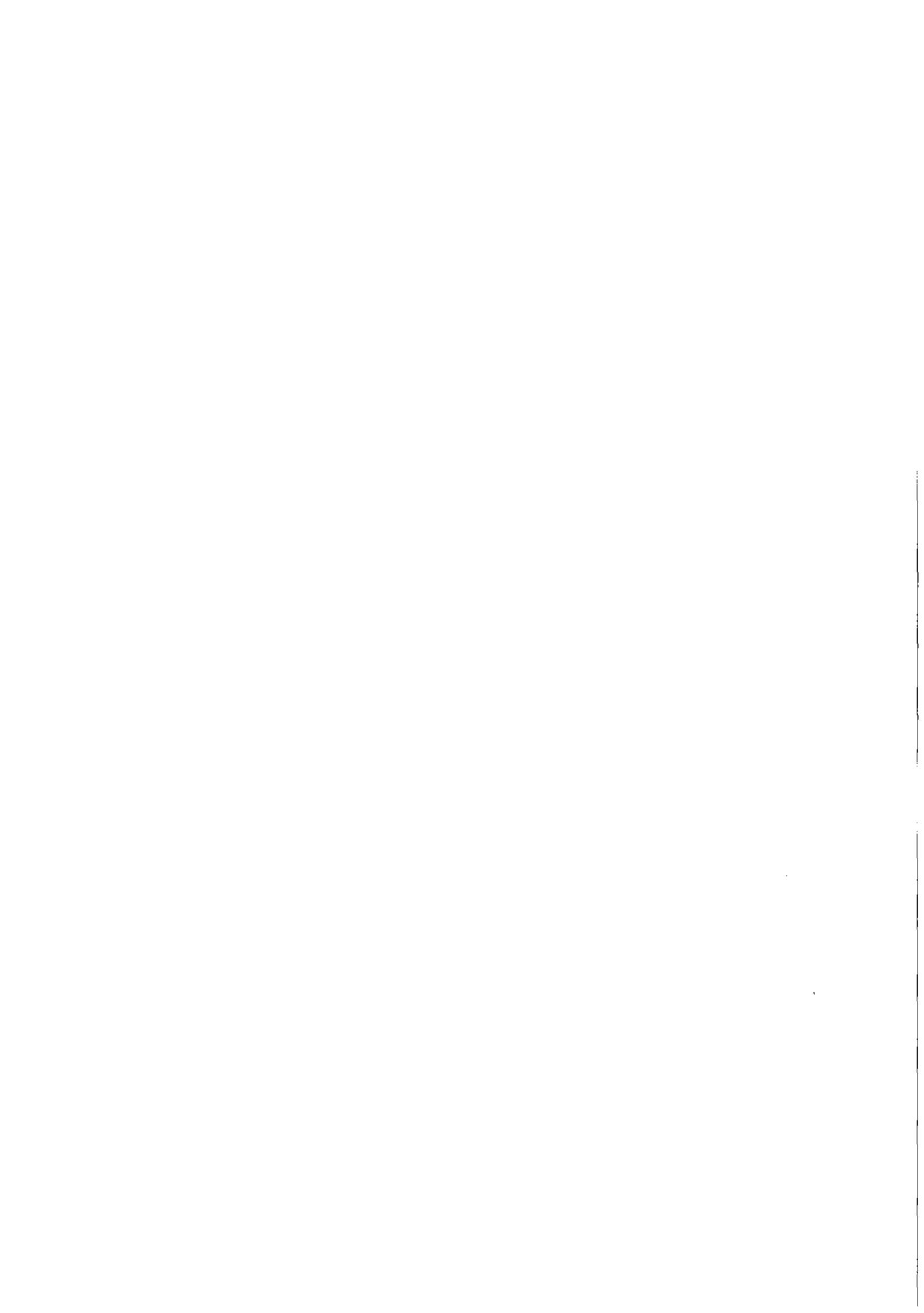
KfK 3196

Juli 1981

Erprobung eines technischen Gegenstrom- Kompaktwärmetauschers für die Trennung von Uranhexafluorid und Wasserstoff

P. Hornberger, D. Seidel, H. Steinhaus
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 3196

ERPROBUNG EINES TECHNISCHEN GEGENSTROM-KOMPAKTWÄRMETAUSCHERS FÜR DIE
TRENNUNG VON URANHEXAFLUORID UND WASSERSTOFF

P. Hornberger*), D. Seidel, H. Steinhaus

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Bei der Anreicherung des leichten Uranisotops U-235 nach dem Trenndüsenverfahren müssen am Kopf und an den Abstufungsstellen der Kaskade UF_6 und leichtes Zusatzgas (H_2) getrennt werden. Nach der Grobtrennung mit einer speziellen Trenndüsenstufe ist eine Feintrennung mit einem Tieftemperaturabscheider geplant, der als Kompaktwärmetauscher ausgebildet ist.

Im Rahmen des Berichts wird ein repräsentativer Abschnitt der für den technischen Betrieb vorgesehenen Abscheiderblöcke unter Verfahrensbedingungen erstmals erprobt. Es wird nachgewiesen, daß die in der Auslegung vorgesehene Beladungskapazität erreicht wird und dabei die UF_6 -Restkonzentration im austretenden Wasserstoff auf Werte unter 1 ppm abgesenkt werden kann. Es wird weiterhin gezeigt, daß sich die für das störungsfreie Zusammenspiel von Abscheidungstrennstufe und Tieftemperaturabscheider entscheidende Konstanz des Druckabfalls am Abscheider durch direkte Steuerung der Kältemittelzufuhr von der konstantzuhaltenden Größe erzwingen läßt. Für die industrielle Anwendung, bei der mehrere Tieftemperaturabscheider zeitlich versetzt betrieben werden müssen, wird ein Steuerungskonzept vorgeschlagen, das auf relativ einfache Weise eine optimale Ausnutzung der Abscheiderkapazität auch unter wechselnden Betriebsbedingungen ermöglicht.

Testing a Technical-scale Counterflow Compact Heat Exchanger for the Separation of Uranium Hexafluoride from Hydrogen

Abstract

When enriching the light uranium isotope U-235 according to the separation nozzle method, UF_6 and light auxiliary gas (H_2) must be separated from each other at the head as well as at the shoulder of the cascade. After pre-separation at a special separation nozzle stage, fine separation is planned by means of a low-temperature separator made as a compact heat exchanger.

This report describes first testing under process conditions of a representative section of the separator blocks intended for technical-scale operation. It is proved that the rated loading capacity is attained while the residual UF_6 concentration contained in the escaping hydrogen can be lowered down to values less than 1 ppm. It is further shown that the requirement of constant pressure drop at the separator, which is decisive for the smooth interplay of preseparator stage and low-temperature separator, can be imposed by direct control of the supply of the refrigerating medium through the variable to be kept constant. A concept of control is proposed for industrial application necessitating the operation of several low-temperature separators staggered in terms of time. This concept allows the relatively simple optimum utilization of the separator capacity even under variable operating conditions.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung und Überblick	1
2. Aufbau des Tieftemperaturabscheiders	5
3. Versuchsanlage	9
3.1 Kreislauf des Verfahrensgases	9
3.2 Die Frigenkreisläufe zum Abkühlen und Aufwärmen des Abscheiders	13
4. Meßtechnik	14
4.1 Gewinnung der Meßdaten	14
4.2 Verarbeitung der Meßdaten	16
4.3 Ermittlung der effektiven Belegung des Abscheiders mit UF ₆	18
5. Experimente	20
5.1 Temperaturverteilung im Abscheider und erreichbare UF ₆ -Restkonzentration	20
5.2 Druckverteilung im Abscheider in Abhängigkeit von der Beladung	20
5.3 Konstanz des Druckabfalls am Abscheider bei starken zeitlichen Schwankungen des UF ₆ -Angebots	25
6. Diskussion der Ergebnisse	28
Literaturverzeichnis	33

1. Einleitung und Überblick

Das Trenndüsenverfahren zur Anreicherung des leichten Uranisotops U-235 beruht auf der partiellen räumlichen Entmischung verschieden schwerer Komponenten in einer schnellen gekrümmten Strömung eines Gemisches aus etwa 4 Mol% Uranhexafluorid (UF_6) und etwa 96 Mol% Wasserstoff (H_2) /1,2/. Das Verfahren findet eine erste technische Anwendung im Rahmen des zwischen der Bundesrepublik und Brasilien im Einvernehmen mit der internationalen Atomenergiebehörde abgeschlossenen Kernenergieabkommens /3/.

Die Beimischung des leichten Zusatzgases verbessert die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erheblich. Die in den Trenndüsen herrschenden Zentrifugalkräfte bewirken dabei jedoch neben der gewünschten Anreicherung der Uranisotope eine um Größenordnungen stärkere Entmischung von Zusatzgas und Uranhexafluorid. Diese Gemischtrennung hat in einer Trenndüsenkaskade einen Nettotransport an leichtem Zusatzgas in Richtung Kaskadenkopf zur Folge. Um eine Anreicherung des Zusatzgases in den Kopfstufen der Kaskade zu verhindern, muß der Nettotransport aus den Kopfstufen der Kaskadenabschnitte entnommen und den Fußstufen zugeführt werden.

Für die Trennung von UF_6 und Zusatzgas wurde eine Kombination von Trenndüsen-Vorabscheidung und Tieftemperatur-Feinabscheidung des UF_6 vorgeschlagen /4/. Dabei soll der Hauptteil des anfallenden UF_6 in der Vorabscheidungstrennstufe kontinuierlich abgetrennt und an den Kopf des jeweiligen Kaskadenabschnittes zurückgeführt werden, während die in der leichten Fraktion verbleibende UF_6 -Menge durch Abkühlung auf Temperaturen unterhalb des Desublimationspunktes des UF_6 in zyklisch arbeitenden Gegenstrom-Kompaktwärmetauschern ausgefroren wird. Es wurde vorgesehen, daß das aufgetaute UF_6 über ein Puffergefäß und eine Regeleinrichtung zum Kopf der Kaskade zurückströmt, während das praktisch UF_6 -freie Zusatzgas am Kaskadenfuß bzw. an den unteren Abstufungsstellen eingespeist wird.

Da vom Zusatzgas eventuell noch mitgeführte UF_6 -Reste an U-235 angereichert sind, bedeutet ihre Einspeisung in Anlagenteile mit niedrigem U-235-Gehalt eine Isotopenvermischung und damit einen Trennleistungsverlust. Man kann zeigen, daß durch 1 ppm UF_6 im zurückgespeisten Zusatzgas rund 2% der Trennleistung der Anlage verlorengehen.

Abb.1 zeigt die benötigte Kühler-Endtemperatur, um im thermodynamischen Gleichgewicht eine UF_6 -Endkonzentration von 1 ppm bzw. 0,1 ppm zu erreichen in Abhängigkeit vom Absolutdruck des UF_6/H_2 -Gemisches. Da der vorgesehene Absolutdruck bei etwa 150 mbar liegt, ist zur Begrenzung des UF_6 -Restgehaltes auf 0,1 ppm bereits im thermodynamischen Gleichgewicht eine Temperaturabsenkung unter -100°C erforderlich.

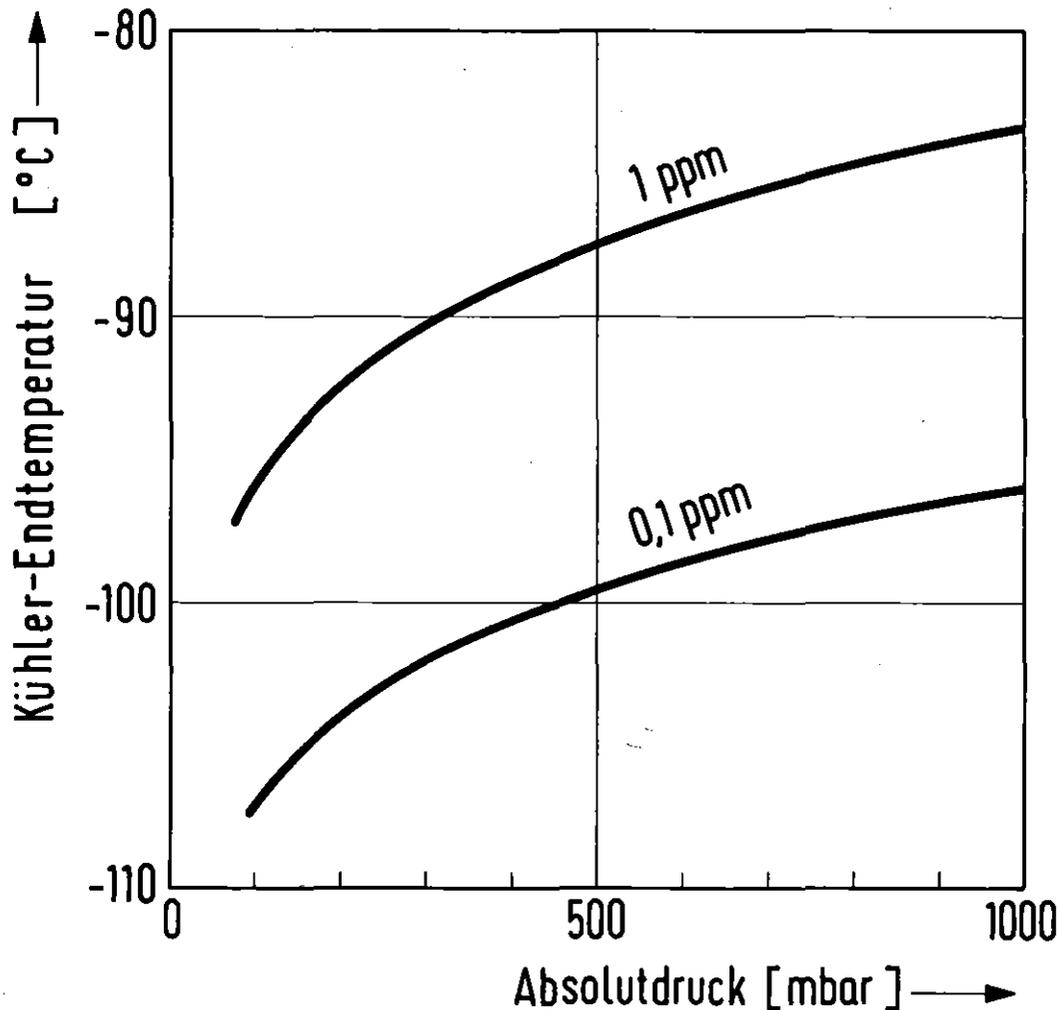


Abb.1 Die benötigte Kühler-Endtemperatur, um im thermodynamischen Gleichgewicht eine UF_6 -Restkonzentration von 1 ppm bzw. 0,1 ppm zu erreichen in Abhängigkeit vom Absolutdruck des UF_6/H_2 -Gemisches.

Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs und der niedrigen Diffusionskonstante des UF_6 muß bei der in einer technischen Anlage anzustrebenden schnellen Abkühlung mit einer starken Übersättigung des UF_6 gerechnet werden, die zu einer Schneebildung in der Gasphase und damit zu einer unvollständigen UF_6 -Abscheidung führen könnte. In einer

weiteren Arbeit /5/ wurde jedoch gezeigt, "daß mit einer Endtemperatur im Bereich von -120°C auch bei starker thermischer Überlastung in dem gewählten Gegenströmersystem die Übersättigung des UF_6 auf Werte unterhalb 1000 begrenzt bleibt und daß dabei noch kein Aussublimieren von UF_6 -Schnee im Gasstrom auftritt." Aufgrund dieser Ergebnisse konnte in der erwähnten Arbeit für das Gegenstrom-Abscheidersystem "eine Betriebsweise mit einseitig wanderndem Temperaturprofil ausgearbeitet und erprobt werden, bei der der UF_6 -Taupunkt bei praktisch feststehender Abscheiderendtemperatur vom kalten zum warmen Ende hin kontrolliert so verschoben wird, daß sich eine gleichmäßige Schichtdickenbelegung des UF_6 in der Abscheiderpassage ergibt."

Der bei den früheren Untersuchungen benutzte Gegenstrom-Kompaktwärmetauscher war speziell für den Versuchsbetrieb ausgelegt worden. In der vorliegenden Arbeit wird ein technischer Wärmetauscher beschrieben und in systematischen Versuchen erprobt, wie er in der sogenannten Vorlauf-Kaskade¹⁾ eingesetzt werden soll. In Abb.2 sind die beiden Ausführungen gegenübergestellt.

Als wesentlicher Unterschied fällt auf, daß bei der neuen Version Vorkühler, Abscheider und Endkühler zu einer Einheit zusammengefaßt sind. Dadurch entfallen die Rohrleitungen zwischen den einzelnen Abschnitten, samt den auf tiefer Temperatur liegenden und daher relativ störanfälligen Absperrventilen. Als Nachteil wird in Kauf genommen, daß der Vorkühler und der Endkühler in den Temperaturzyklus einbezogen werden, wodurch der mittlere Kältebedarf etwas ansteigt. Der zweite wichtige Unterschied ist der Ersatz des früher für den Abbau der Übersättigung benutzten Filters durch einen als "Finfilter" ausgebildeten Endkühler mit wesentlich engeren Gaspassagen. Ein Verstopfen des Endkühlers ist nicht zu befürchten, da bei der vorgesehenen Betriebsweise nur sehr geringe Mengen UF_6 in diesen Teil des Abscheiderblocks gelangen. Schließlich ist noch zu bemerken, daß bei der neuen Ausführung die Kälte- bzw. Wärmeübertragung, wie beim technischen Einsatz, mit flüssigem Frigen 12 erfolgt, während dafür bei den früheren Versuchen gasförmiger Stickstoff verwendet wurde.

¹⁾ Als Vorlauf-Kaskade wird ein im Bau befindlicher aus 24 Trennstufen, einer UF_6 -Abscheidungsanlage und verschiedenen Hilfseinrichtungen bestehender erster Teil der brasilianischen Trenndüsendemonstrationsanlage bezeichnet /3/. Mit der Vorlauf-Kaskade sollen die Strategien für den Bau und Betrieb der Demonstrationsanlage erprobt werden.

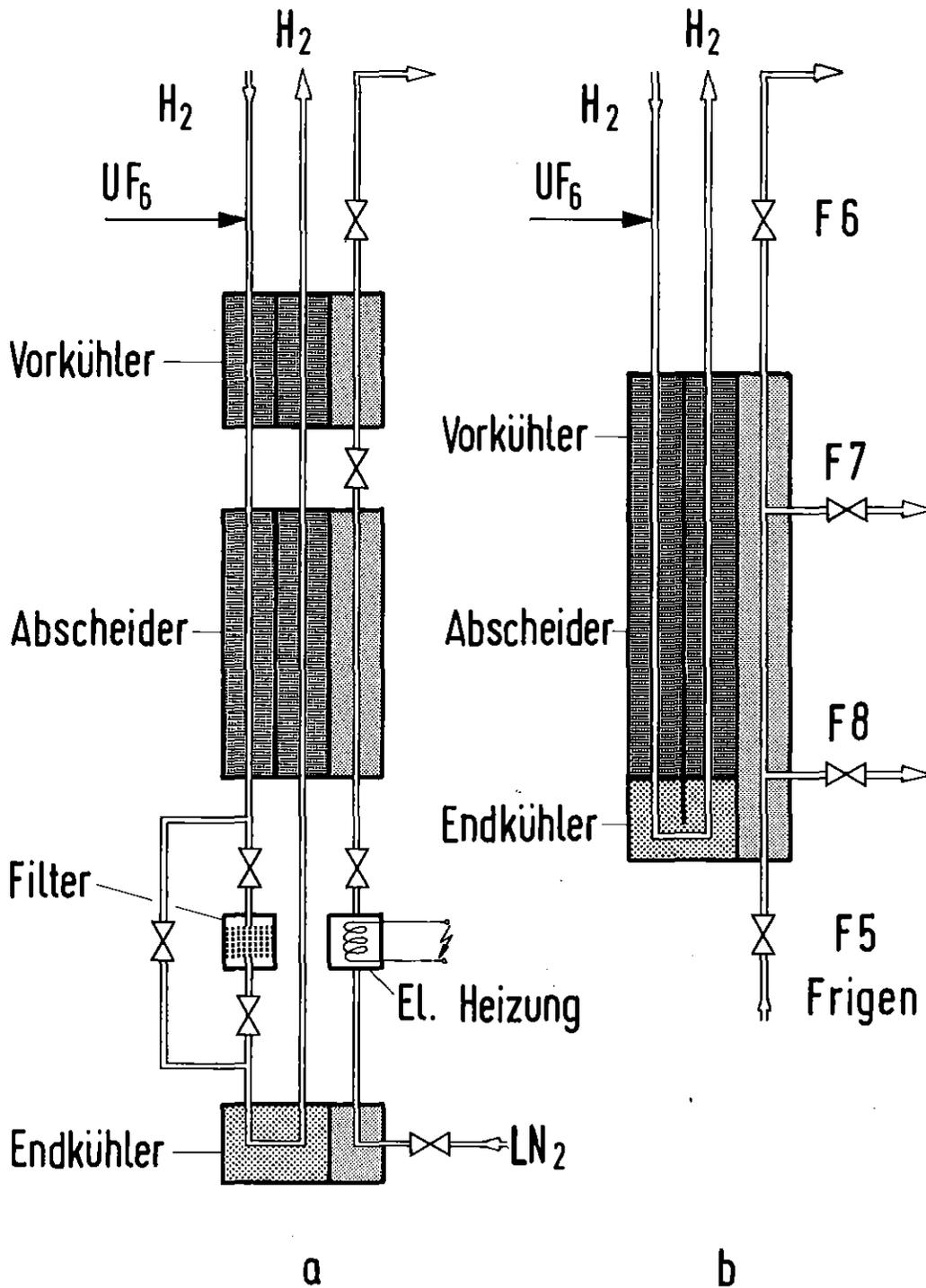


Abb.2 Vergleich der in der vorliegenden Arbeit benutzten technischen Version des Gegenstrom-Kompaktwärmetauschers (b) mit der bei den früheren Untersuchungen /5/ verwendeten Ausführung (a). Die Ventilbezeichnungen im rechten Teil der Abbildung entsprechen Abb.7 (Seite 32).

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß auch mit der wesentlich vereinfachten technischen Version des Gegenstrom-Kompaktwärmetauschers die vorgesehene UF_6 -Beladung und die angestrebte UF_6 -Restkonzentration erreicht werden. Darüber hinaus wird nachgewiesen, daß sich die für das störungsfreie Zusammenspiel von Vorabscheidungstrennstufe und Tieftemperaturabscheider entscheidende Konstanz des Druckabfalls am Abscheider durch direkte Steuerung der Kältemittelzufuhr von der konstant-zuhaltenden Größe erzwingen läßt.

Für die industrielle Anwendung in der Vorlaufkaskade, in der mehrere Tieftemperaturabscheider zeitlich versetzt betrieben werden müssen, wird ein Steuerungskonzept vorgeschlagen, das auf relativ einfache Weise eine optimale Ausnutzung der Abscheiderkapazität auch unter wechselnden Betriebsbedingungen ermöglicht.

2. Aufbau des Tieftemperaturabscheiders

Das Aufbauschema des als Tieftemperaturabscheider verwendeten Gegenstrom-Kompaktwärmetauschers geht aus Abb.3 hervor. Die charakteristischen Daten der verschiedenen Passagen sind in Tab.1 zusammengestellt. Die Passagen, in denen das UF_6 aus dem Verfahrensgasgemisch abgeschieden wird, sind mit besonders hohen Rippen ausgestattet, so daß sich ein verhältnismäßig großer Volumenanteil für die Abscheidung des UF_6 ergibt. Die Abbildung läßt die abgesetzte Berippung mit kurzen Rippenlängen in den Abscheiderpassagen erkennen. Damit wird die Strömung ständig im Bereich der thermischen und hydrodynamischen Anlaufstrecke gehalten. Dies führt zur erwünschten Verbesserung des Stofftransports gegenüber dem Wärmetransport.

Bei der Dimensionierung der Berippung der Passagen wurde nach den in /4/ beschriebenen Auswahlkriterien vorgegangen, die einen günstigen Kompromiß zwischen hoher Beladungsmöglichkeit, kleinem Druckabfall und niedriger treibender Temperaturdifferenz zwischen Strömungskern und Wand in der Abscheidepassage vorsehen. Die Passagen für das zurückgeführte, gereinigte Zusatzgas besitzen eine glatte, perforierte

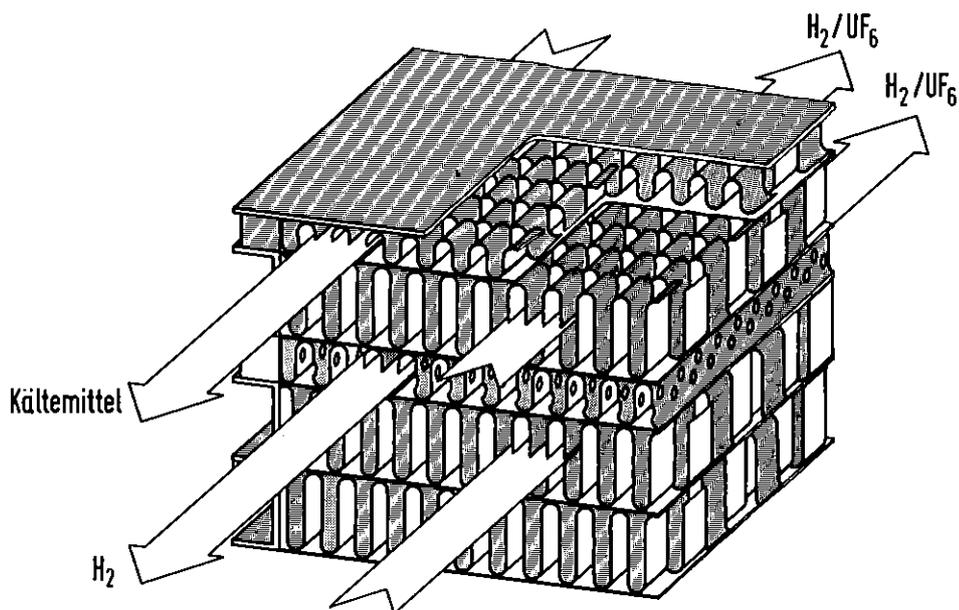


Abb.3 Aufbau des als Tieftemperaturabscheider verwendeten Gegenstrom-Kompaktwärmetauschers mit abgesetzten Rippen in den H_2/UF_6 - und Frigenpassagen und glattem, gelochtem Profil in der Rückström-passage für das reine H_2 .

Passage	H_2/UF_6	Endkühler	H_2	Frigen
Code	500 (S) 1008	500 (S) 2208	280 (R) 1008/5	22 (S) 1008
Spalthöhe	12,70 mm	12,70 mm	7,13 mm	5,11 mm
Spaltbreite	2,34 mm	0,95 mm	2,34 mm	1,47 mm
Fintyp	alle 3,2 mm versetzt	alle 3,2 mm versetzt	gerade, perforiert	alle 3,2 mm versetzt
freie Fläche je Passage	100 cm ²	90 cm ²	56 cm ²	40 cm ²
Passagenzahl	8	8	4	3

Tab. 1 Charakteristische Daten des Abscheiderblocks (vgl. Abb.3).

Hersteller: Fa. Trane, Epinal, Frankreich

Berippung geringer Höhe. Für das Kältemittel sind Passagen niedriger Höhe mit abgesetzten Rippen gewählt worden, die für eine gute Übertragung der Kälte an den Abscheiderblock sorgen.

Abb.4 zeigt schematische Längsschnitte durch die 3 Passagen des Abscheiderblocks mit den dazugehörigen Anschlüssen. Das Ausgangsgas (H_2/UF_6) und der vom UF_6 befreite Wasserstoff werden am oberen Abscheiderende zu- bzw. abgeführt. Die Anschlußstutzen sind mit den vertikal verlaufenden Passagen durch kurze Bereiche mit schräg gestellten Rippen verbunden, die als Stromverteiler wirken. Die Passagen für das Ausgangsgas und den reinen Wasserstoff stehen am unteren Abscheiderende in voller Breite durch einen Umlenkdom in Verbindung. Die Passagen für das als Kälte- bzw. Wärmeträger benutzte flüssige Frigen haben ihre Anschlüsse an den beiden Seiten des Abscheiderblocks.

Trotz der Stromverteiler kann nicht mit einer völlig gleichmäßigen Verteilung der Ströme über die gesamte Abscheiderbreite gerechnet werden. Um in dieser Beziehung vergleichbare Bedingungen wie bei der technischen Anwendung zu haben, wurden Länge und Breite des Abscheiderblocks wie bei den entsprechenden Einheiten der Vorlaufkaskade gewählt. Lediglich die Anzahl der aufeinandergeschichteten Passagen wurde auf $1/7$ reduziert, um die umzusetzenden Gas- und Kälte-trägerströme in tragbaren Grenzen zu halten. Unter den für die Vorlaufkaskade vorgesehenen Betriebsbedingungen hat der in der vorliegenden Arbeit benutzte Abscheiderblock pro Stunde $5,8 \text{ kmol } H_2$ und $16,0 \text{ Mol } UF_6$ zu verarbeiten.

Bezeichnet man die Frigenpassage mit F, die Gemischpassage mit U und die H_2 -Passage mit H, so läßt sich die Anordnung der aufeinandergeschichteten Passagen in dem verwendeten Abscheiderblock durch die Buchstabenfolge

F U H U U H U F U H U U H U F

darstellen.

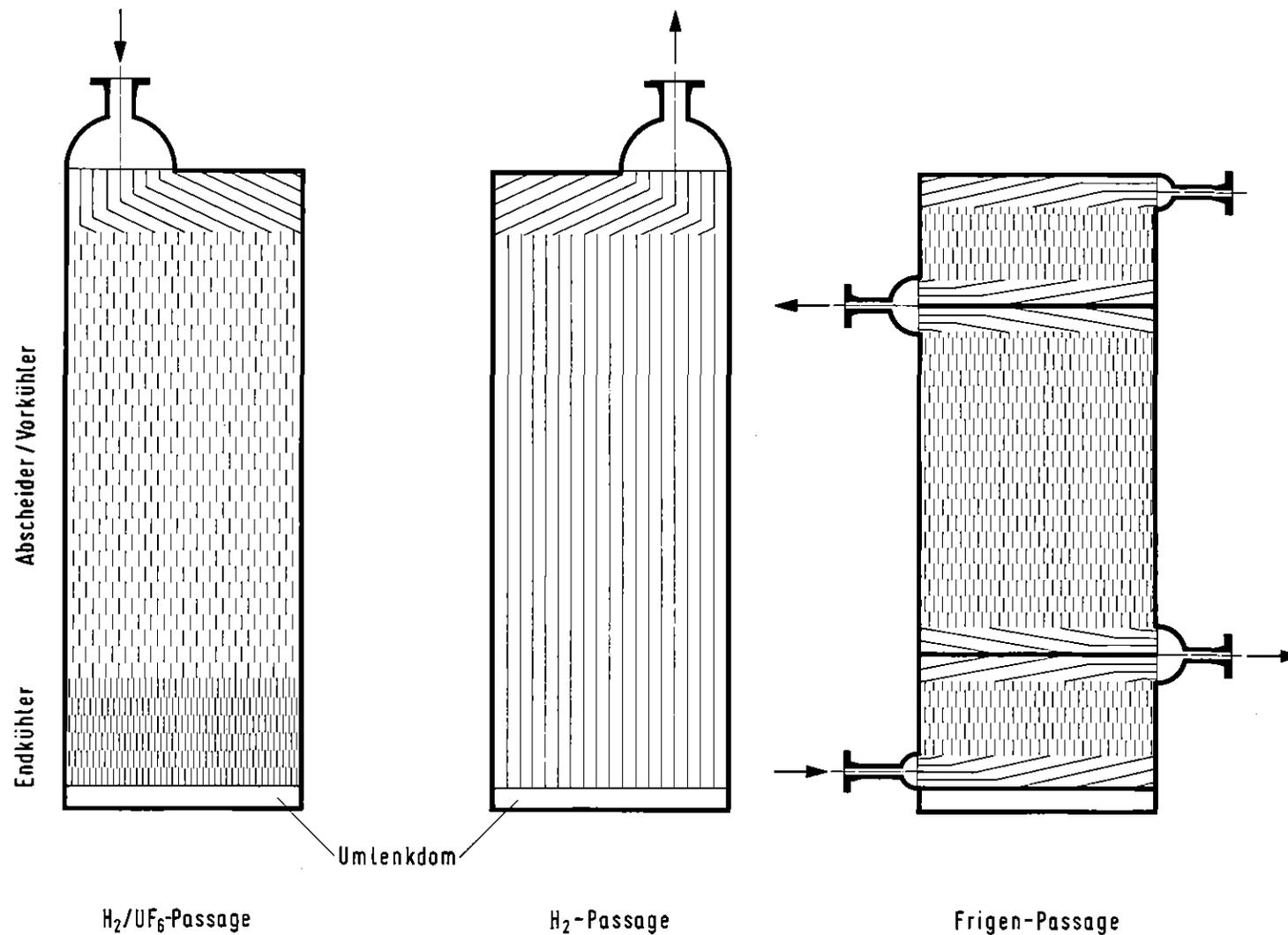


Abb.4 Längsschnitte durch die 3 Passagen des Abscheiderblocks mit den dazugehörigen Anschlüssen. Die Passagen für das H_2/UF_6 -Gemisch und den Rein- H_2 sind am unteren Ende über einen Umlenkdom verbunden. Die Berippung ist im Vergleich zu der äußeren Kontur stark vergrößert dargestellt. Die Richtungspfeile kennzeichnen die Fließrichtung im Abscheidebetrieb.

Für die Versuchsauswertung ist die Kenntnis des Druck- und Temperaturverlaufs im Abscheider von großer Bedeutung. Der Abscheiderblock wurde daher mit zahlreichen Druckmeßanschlüssen und Widerstandsthermometern versehen, deren Positionen und Bezeichnungen aus Abb.5 hervorgehen. Die Druckmeßanschlüsse sind mit der H_2/UF_6 -Passage verbunden, während die Widerstandsthermometer im Temperaturkontakt mit dem Abdeckblech des Abscheiderblocks stehen.

3. Versuchsanlage

Für die Versuche stand eine bereits früher benutzte Anlage zur Verfügung /5/, die an die neue Aufgabe angepaßt werden mußte. Neben dem Ersatz des Tieftemperaturabscheiders waren die Einführung der Frigenkühlung und eine Weiterentwicklung der Meßwerterfassung und -verarbeitung die wichtigsten Maßnahmen. Abb.6 zeigt ein Foto der Versuchsanlage, die 1973 im Institut für Kernverfahrenstechnik aufgestellt wurde und in den Jahren 1978/79 in den jetzigen Zustand gebracht wurde. Zum besseren Verständnis werden im folgenden anhand Abb.7 (s.S.32) auch die Funktionen derjenigen Anlagenteile beschrieben, die unverändert übernommen werden konnten.

3.1 Kreislauf des Verfahrensgases

Der Wasserstoff wird vom Umwälzverdichter C1²⁾ mit einer Stromstärke von etwa 1100 m³/h eff. angesaugt und über einen Kühler W1 einem Pufferbehälter von 0,5 m³ Inhalt zugeführt. Hinter dem Pufferbehälter kann der Gasdurchsatz mit Hilfe des Differenzdruckes DPH1 gemessen werden. Vor Durchströmen des Handventils H1 wird dem Wasserstoff UF_6 in der

²⁾ C1 ist ein Faltenbalg-gedichteter sechszyklindriger Toruskolbenverdichter mit berührungsfrei geführten Kolben.
Hersteller: Hispano-Suiza, Bois-Colombes, Frankreich.

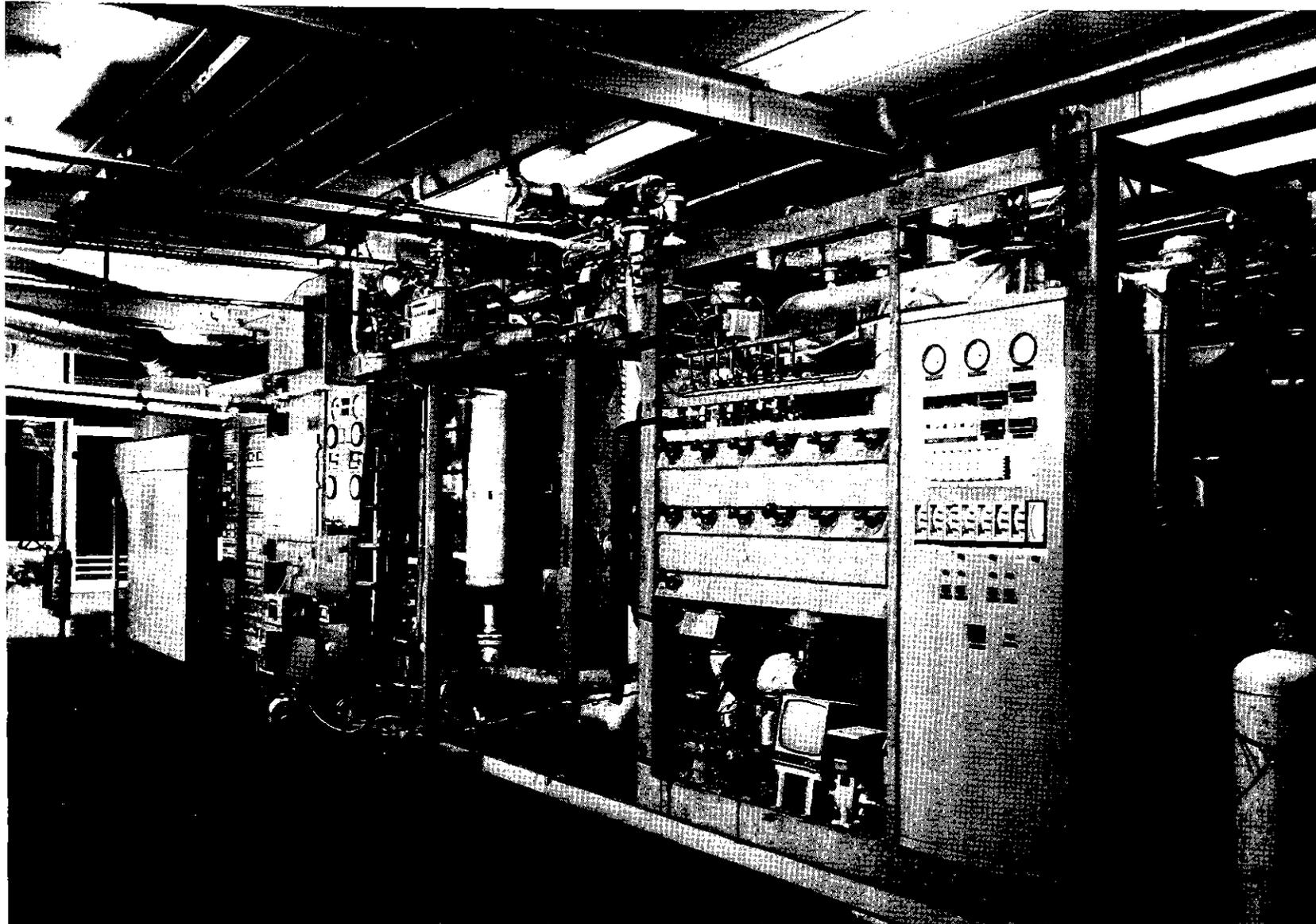


Abb.6 Versuchsanlage im Institut für Kernverfahrenstechnik zur Erprobung der technischen Version der Tieftemperaturabscheidung. Rechts im Vordergrund ist die Kälteanlage zu sehen, in der Mitte der Anlage befindet sich der Abscheider (halb verdeckt). In der Mitte der linken Bildhälfte ist der UF_6 -Teil (Einspeise- und Vorratsteil) zu sehen. In dem großen Schallschutzgehäuse links im Bildhintergrund befindet sich der Zusatzgas-Umwälzverdichter.

gewünschten Menge beigemischt. Das Gas erreicht über das Handventil H4 den Tieftemperaturabscheider W2, in dem das UF_6 ausfriert. Am unteren Ende des Abscheiderblocks wird der reine Wasserstoff umgelenkt und im Gegenstrom zum Verfahrensgemisch nach oben geführt. Nach Durchströmen des Handventils H5 gelangt er über den Vorwärmer W10 zum Umwälzverdichter zurück.

UF_6 wird in fester Form in einem Stahl-Vorratsbehälter gespeichert. Sein Dampfdruck (≈ 100 mbar bei Zimmertemperatur), der gleichzeitig der Vordruck der anschließenden UF_6 -Einspeiseregulierungsstrecke ist, kann durch Heißwasser auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Das Heißwasser durchströmt dazu eng um den Stahlbehälter gewickelte Kupferrohre. Die Regelung erfolgt mit der elektrischen Wassererhitzung. Der UF_6 -Vorratsbehälter und das unmittelbar anschließende, gegebenenfalls unter Überdruck stehende Leitungs- und Ventilsystem sind von einem Gehäuse umgeben, das mit umgewälzter Luft temperiert werden kann.

Während der Einspeisephase strömt gasförmiges UF_6 über die Ventile UB, U1, U2 und U10 zu den Einspeiseblenden FU1 und FU2. Der Blendenvordruck wird mit dem Druckaufnehmer PU6 gemessen und mit Hilfe des Ventils U10 geregelt. Über die Ventile U11 und/oder U12 erreicht das UF_6 den Durchflußmesser FU5 und wird über das Ventil U9 dem Wasserstoffstrom beigemischt.

Nach Beendigung der UF_6 -Abscheidung wird der gesamte Wasserstoff über den kalten Abscheider durch das Ventil V1 abgepumpt. Während der anschließenden Aufwärmphase sind alle Ventile des Wasserstoffkreislaufs und des Einspeisesystems geschlossen. Über die Handventile H4 und U8 wird das verdampfte UF_6 von dem Spiralverdichter C5³⁾ angesaugt und über die Ventile U7, U6, U5, U3, U2, U1 und UB in den mit Wasser gekühlten UF_6 -Vorratsbehälter zurückgedrückt.

Die H_2/UF_6 -Passagen des Abscheiders und der UF_6 -Vorratsbehälter sind mit Grenzwertmeldern für Druck ausgerüstet, die bei Überschreiten des Sollwertes einen optischen und akustischen Alarm auslösen. Um eine ungewollte UF_6 -Kondensation zu verhindern, sind alle UF_6 -führenden Leitungen mit elektrischen Heizungen versehen, die zum Schutz gegen örtliche Überhitzung mit Temperaturalarmgebern ausgerüstet sind.

³⁾ Hersteller: Normetex, Pont Audemer, Frankreich

3.2 Die Frigenkreisläufe zum Abkühlen und Aufwärmen des Abscheiders

Die für den jeweiligen Betriebszyklus benötigte Kälte- bzw. Heizleistung wird dem Abscheiderblock über das als Wärmeüberträger benutzte flüssige Frigen von einer Anlage zugeführt, in der Kälte von flüssigem Stickstoff, bzw. Wärme von einem elektrischen Erhitzer geliefert wird ⁴⁾. Das Frigen wird in der Einkühl- und Abscheidephase auf -120°C abgekühlt und in der Aufheiz- und Austragphase auf 40°C erwärmt. Für die Kühl- und die Heizphasen sind getrennte Kreisläufe vorgesehen.

Im Kühlkreislauf fördert die Pumpe C2 das Frigen über die Rückschlagklappe R3 in den Kältemittel-Pufferbehälter. Von dort gelangt es zum N_2 -Gegenstrom-Wärmetauscher W8, der aus einem Vorratsbehälter über das Handventil N1 und das Regelventil N2 mit flüssigem Stickstoff versorgt wird. Der verdampfende Stickstoff verläßt den Wärmetauscher über die Rückschlagklappe R2 und gelangt ins Freie. In der Anfahrphase kann der Pufferbehälter über eine Bypassleitung und das Regelventil F16 solange mit kaltem Frigen versorgt werden, bis der ganze darin gespeicherte Vorrat die Temperatur von -120°C angenommen hat.

In der Einkühlphase wird kaltes Frigen über das Handventil F18, den Laminarelementdurchflußmesser FF4, das Handventil F5 und ein Filter in den Endkühler des Abscheiderblocks geleitet. Es verläßt den Abscheider über ein Filter und das Handventil F8, wonach der Durchsatz mit Hilfe des Turbinendurchflußmessers FF2 ermittelt wird. Der Meßwert kann zur automatischen Steuerung des Durchsatzes über das Regelventil F14 verwendet werden. Anschließend wird das Frigen an die Saugseite der Kältemittelpumpe C2 zurückgeführt.

In der Abscheidephase wird der Desublimationspunkt des UF_6 mit einem über das Ventil F7 austretenden Frigen-Teilstrom zum warmen Ende des Abscheiders verschoben. Der Frigendurchsatz durch diesen Zweig wird vom Laminarelementdurchflußmesser FF3 gemessen und mit dem Regelventil F15 geregelt. Anschließend wird auch dieser Teilstrom des Frigens der Kältemittelpumpe C2 wieder zugeführt.

⁴⁾ Hersteller: Gebr. Sulzer, Winterthur, Schweiz.

Im Heizkreislauf fördert die Pumpe C3 Frigen über die Rückschlagklappe R1 durch die elektrische Heizung W9, die über die Temperatur des in den Abscheider einströmenden Frigens geregelt wird. Zur Minderung des Frigendurchsatzes kann das Frigen im Bypass über das Regelventil F17 an die Saugseite der Pumpe C3 zurückgeführt werden.

Mit Hilfe des Turbinendurchflußmessers FF1 wird der Frigendurchsatz ermittelt und das Regelventil F13 gesteuert. Über das Handventil F12, den Laminarelementdurchflußmesser FF4 und das Ventil F5 gelangt das erwärmte Frigen in den Endkühler des Abscheiders W2, durchströmt den gesamten Abscheiderblock, verläßt diesen über das Ventil F6 und wird über das Ventil F11 an die Saugseite der Pumpe C3 zurückgeführt. In diesem Falle sind die Handventile F9 und F10 geschlossen. Soll der Abscheider W2 von oben nach unten mit erwärmtem Frigen durchströmt werden, so sind die Handventile F9 und F10 zu öffnen, dagegen die Handventile F11 und F12 zu schließen.

4. Meßtechnik

4.1 Gewinnung der Meßdaten

Alle für den Anlagenbetrieb wichtige Druckmeßstellen sind mit direktanzeigenden Manometern⁵⁾ ausgerüstet (im Fließbild Abb.7 dargestellt durch schwarzes Feld rechts im Meßstellensymbol). Alle Drücke, die für Regelzwecke oder für die Meßwertfassung wichtig sind, werden mit elektrischen Absolutdruckaufnehmern⁶⁾ gemessen. Längs des Abscheiders werden die Differenzdrücke mit einem Differenzdruckaufnehmer⁷⁾ ermittelt. Die jeweils interessierende Meßstelle (AV2 bis AV13 in Abb.5) wird automatisch über elektrisch-pneumatische Ventile an den Differenzdruckaufnehmer angeschlossen.

⁵⁾ Hersteller: Appleby and Ireland, Alton, England; Typ: AI 101

⁶⁾ Hersteller: Bell & Howell, Basingstoke, England; Typ: BHL-4100-00-01M0

⁷⁾ Hersteller: Validyne, USA; Typ P10/CD12

Alle Temperaturmeßstellen sind mit Widerstandsthermometern Pt-100 mit einer Eichgenauigkeit von ± 0.2 K bestückt. Meßstellen, die für eine Temperaturregelung oder -alarmüberwachung notwendig sind, besitzen einen eigenen Meßwertumformer⁸⁾, der die Widerstandskennlinie linearisiert und eine temperaturanaloge Spannung von 0 bis 10 mV liefert. Für zusätzliche Temperaturmessungen zu Meßdatenerfassungszwecken werden Widerstandsthermometer mit einer konstanten Spannung betrieben, die über Potentiometerschaltung und Vorwiderstand Spannungen im mV-Bereich abgeben. Von einem Rechner werden diese Spannungen in entsprechende Temperaturen umgerechnet und linearisiert.

Der Wasserstoffstrom wird mit Hilfe des an einem Laminarelement erzeugten Druckabfalls bestimmt. Mit diesem Meßwert und den Stoffdaten des Wasserstoffs ermittelt der Rechner (vgl. 4.2) im On-Line-Betrieb den Wasserstoffdurchsatz FH1. Der UF₆-Einspeisestrom wird mit dem Laminarelementdurchflußmesser FU5 gemessen. Die Regelung des Einspeisestroms erfolgt rechnergestützt durch Betätigung des Regelventils U10, welches den Blendenvordruck PU6 vor den Meßblenden FU1 und FU2 einstellt. Da im überkritischen Bereich gearbeitet wird, ist der Blendenvordruck proportional zum UF₆-Durchsatz.

Die Messung des UF₆-Restgehaltes im Wasserstoff erfolgte wie früher /5/ mit Hilfe eines Zweistrahl-Infrarotspektrophotometers⁹⁾, das mit 0,5 m langen Küvetten mit AgCl-Fenstern ausgerüstet ist. Es konnte gezeigt werden /6/, daß bis zu Partialdrucken von ca. 1×10^{-4} mbar ein linearer Zusammenhang zwischen den eingestellten UF₆-Drucken und der gemessenen Extinktion herrscht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden durch Einbau einer Turbomolekularpumpe und Verkürzung der Anschlußleitungen die Voraussetzungen für eine häufige Nullpunktkontrolle mit leerer Meßzelle geschaffen /7/. Durch automatische Berücksichtigung der Nullpunktdrift bei der Rechner-Verarbeitung der Signale konnte die Reproduzierbarkeit der Messungen erheblich verbessert werden. Einen weiteren Fortschritt brachte der Einbau eines Frittenfilters in die Zuleitung der Meßküvette, durch das eine Ablagerung von staubförmigen UF₆-Zersetzungsprodukten auf den Küvettenfenstern und dadurch bedingte Meßfehler vermieden werden konnten.

⁸⁾ Hersteller: Eur-Control, Bochum; Typ: MIR 3/g

⁹⁾ Typ: Perkin Elmer 325,
Hersteller: Bodenseewerke Perkin Elmer, Überlingen

4.2 Verarbeitung der Meßdaten

Alle Meßgrößen werden in elektrische Signale im Bereich von -100 bis +100 mV umgewandelt und gelangen in dieser Form in die Meßwarte. In Abb.8 ist die Meßwertverarbeitung schematisch dargestellt.

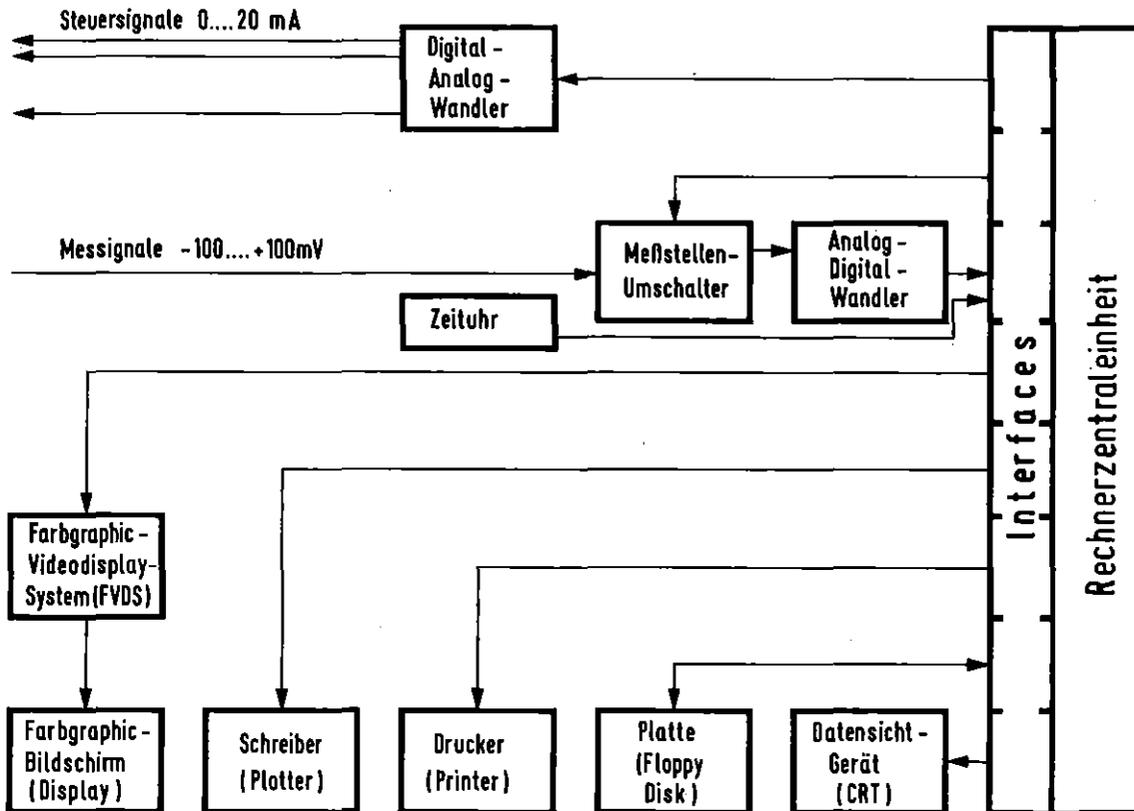


Abb. 8 Schematische Darstellung der Meßwertverarbeitung mit Hilfe des Kleinrechners Wang 2200 VP und Peripheriegeräten.

Von einem Kleinrechner¹⁰⁾ wird ein Meßstellenumschalter¹¹⁾ angesteuert und mit Hilfe eines Digitalvoltmeters¹²⁾ werden alle elektrischen Spannungen abgelesen und in digitaler Form vom Rechner übernommen. Gleichzeitig erfolgt die Übernahme weiterer Informationen wie Uhrzeit, Betriebszykluscode, Ventilstellungen und Steueranweisungen, die ebenfalls in Form elektrischer Spannungen übertragen werden.

Fehler durch Verstärkerdrift treten bei dieser Art der Meßwertverarbeitung nicht auf. Außerdem wird die Genauigkeit der Messungen durch die mögliche mathematische Kurvenanpassung nichtlinearer Größen erhöht. Da die Ansteuerung des Meßstellenumschalters vom Rechner aus vorgenommen wird, können die Informationen mit hoher Geschwindigkeit und häufig hintereinander abgefragt und gespeichert werden.

Im Rechner erfolgt eine On-Line-Auswertung und eine Überprüfung der Ergebnisse. Statische Grenzwerte, Grenzwerte für Änderungsgeschwindigkeiten und zeitlich abhängige Änderungen können vorgegeben werden. Bei Abweichungen der Meßwerte von Sollwerten kann der Rechner aktiv über Ausgabeperipheriegeräte in das Verfahren eingreifen und/oder Entscheidungshilfen für das Bedienungspersonal über Bildschirm, Schnelldrucker, Plotter und Farb-Graphic-System ausgeben. Alle Meßdaten, Verknüpfungsgrößen und Umrechnungsfaktoren können auf Magnetplatten gespeichert und über Bildschirm und Schnelldrucker ausgegeben werden.

¹⁰⁾ Hersteller; Wang, USA; Tewksbury; Typ: 2200-VP

¹¹⁾ Hersteller: Fluke, USA; Typ: 2204A

¹²⁾ Hersteller: Dana, USA; Typ: 5900

4.3 Ermittlung der effektiven Belegung des Abscheiders mit UF₆

Das in der vorliegenden Arbeit benutzte Verfahren zur Ermittlung der effektiven Belegung des Abscheiders mit UF₆ geht von der experimentell festgestellten Tatsache aus, daß der Druckabfall an der leeren H₂/UF₆-Passage im interessierenden Bereich in guter Näherung zur Gasgeschwindigkeit proportional ist /8/. Für den Druckverlust Δp zwischen zwei Meßstellen wird daher der für eine laminare Strömung gültige Ansatz verwendet:

$$\Delta p = c_0 \cdot \eta \cdot w \cdot \frac{l}{d^2} \quad (1)$$

wobei w die Geschwindigkeit, η die dynamische Zähigkeit des Gases, d der hydraulische Durchmesser des Spaltes, l die Länge über die der Differenzdruck Δp gemessen wird und c_0 eine von der Geometrie der Strömungskanäle abhängige Konstante darstellt.

Als Maß für die effektive Belegung wird der Faktor x , ($0 \leq x \leq 1$) eingeführt. $x = 1$ bedeutet völlig freier Abscheiderquerschnitt, $x = 0$ völlig mit UF₆ gefüllter, also verstopfter Abscheiderquerschnitt.

Für die Geschwindigkeit wird nach der Kontinuitätsgleichung $w = w_0/x$ angesetzt, für den Durchmesser aus geometrischen Gründen $d = d_0 \cdot \sqrt{x}$, wobei d_0 der hydraulische Durchmesser und w_0 die Geschwindigkeit im leeren Abscheider ist.

Gl. (1) wird umgeformt zu

$$\Delta p = c_0 \cdot l \cdot \eta \cdot \frac{w_0}{d_0^2 \cdot x^2}$$

c_0 , l und d_0 sind konstante Größen, die sich zur neuen Konstanten $c_1 = c_0 \cdot l/d_0^2$ zusammenfassen lassen. Für die Gl.(1) ergibt sich damit

$$\Delta p = c_1 \cdot \eta \cdot \frac{w_0}{x^2} \quad (2)$$

Aus dem gemessenen Molenstrom \dot{M} , der allgemeinen Gaskonstanten R , der Strömungsquerschnittsfläche A_0 des leeren Abscheiders und den an den jeweiligen Orten herrschenden Temperaturen und Drücken läßt sich die Geschwindigkeit w_0 bestimmen

$$w_0 = \frac{\dot{M} \cdot R \cdot T}{A_0 \cdot p} \quad (3)$$

A_0 und R sind konstante Größen, die sich mit c_1 zur Konstanten $c = c_1 \cdot R / A_0$ zusammenfassen lassen. Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität ergibt sich für den Druckabfall aus Gl.(2):

$$\Delta p = \frac{c \cdot \eta(T) \cdot \dot{M} \cdot T}{p \cdot x^2} \quad (4)$$

woraus sich durch Umformung die Maßzahl für die am jeweiligen Ort vorhandene Abscheiderbelegung ermitteln läßt:

$$x = \sqrt{\frac{c \cdot \eta(T) \cdot \dot{M} \cdot T}{p \cdot \Delta p}} \quad (5)$$

Die in dieser Formel enthaltenen Größen lassen sich entweder messen oder aus gemessenen Größen ableiten, so daß aus der Interpolation der längs des Abscheiders gemessenen Werte die Belegung des Abscheiders in Teilabschnitten berechnet werden kann.

5. Experimente

5.1 Temperaturverteilung im Abscheider und erreichbare UF₆-Restkonzentration

Zur ersten Erprobung des Abscheiders wurde ein Versuch unter Auslegungsbedingungen (16,0 Mol UF₆/h, 5,8 kmol H₂/h vgl. Abschnitt 2) mit Handsteuerung der Frigenströme durchgeführt. Dabei wurde für die Mitte des Gegenströmers (TH 15, Abb.5) eine lineare Temperaturabsenkung auf -120°C in der vorgesehenen Abscheidezeit von etwa 10 Stunden angestrebt. Abb.9 zeigt, daß sich der Abscheider gleichmäßig von unten nach oben abkühlt. Während der Versuchszeit von 10 Stunden konnten rund 50 kg UF₆ abgeschieden werden, was innerhalb der Fehlergrenze den Auslegungsbedingungen entspricht.

Zur Untersuchung des Einflusses der Kühlerendtemperatur auf die UF₆-Restkonzentration wurde bei einem entsprechenden Versuch die Temperatur des Frigens so variiert, daß sich eine Temperaturanzeige des untersten Widerstandsthermometers (TH 24 in Abb.5) zwischen -130 und -75°C ergab (Abb.10b). Aus der gemessenen UF₆-Restkonzentration (Abb.10d) wurde über die Dampfdruckkurve des UF₆ die "effektive" Kühlerendtemperatur berechnet (Abb.10c). Man bemerkt, daß der zeitliche Verlauf von gemessener und "effektiver" Kühlerendtemperatur gut übereinstimmen. Erwartungsgemäß liegt die effektive Kühlerendtemperatur etwas höher, was hauptsächlich darauf zurückzuführen sein dürfte, daß das IR-spektroskopisch untersuchte Gas über den Druckmeßstutzen AV 13 (Abb.5), d.h. am Rand des Abscheiders abgezogen wurde. Aus Abb.10d ist jedoch zu entnehmen, daß auch unter diesen relativ ungünstigen Bedingungen ein UF₆-Restgehalt unter 1 ppm erreicht wurde.

5.2 Druckverteilung im Abscheider in Abhängigkeit von der Beladung

Bei zwei weiteren in Abb.11 und Abb.12 dargestellten Versuchen wurden unter Auslegungsbedingungen die Frigentemperatur und der Frigendurchsatz im Endkühler durch automatische Regelung auf (-120±1,5)°C bzw. (250±2)l/h konstant gehalten. Dabei blieb das Ventil F 7 (vgl. Abb.2 bzw. 7) zunächst geschlossen. Der zwischen den Druckmeßstutzen AV2

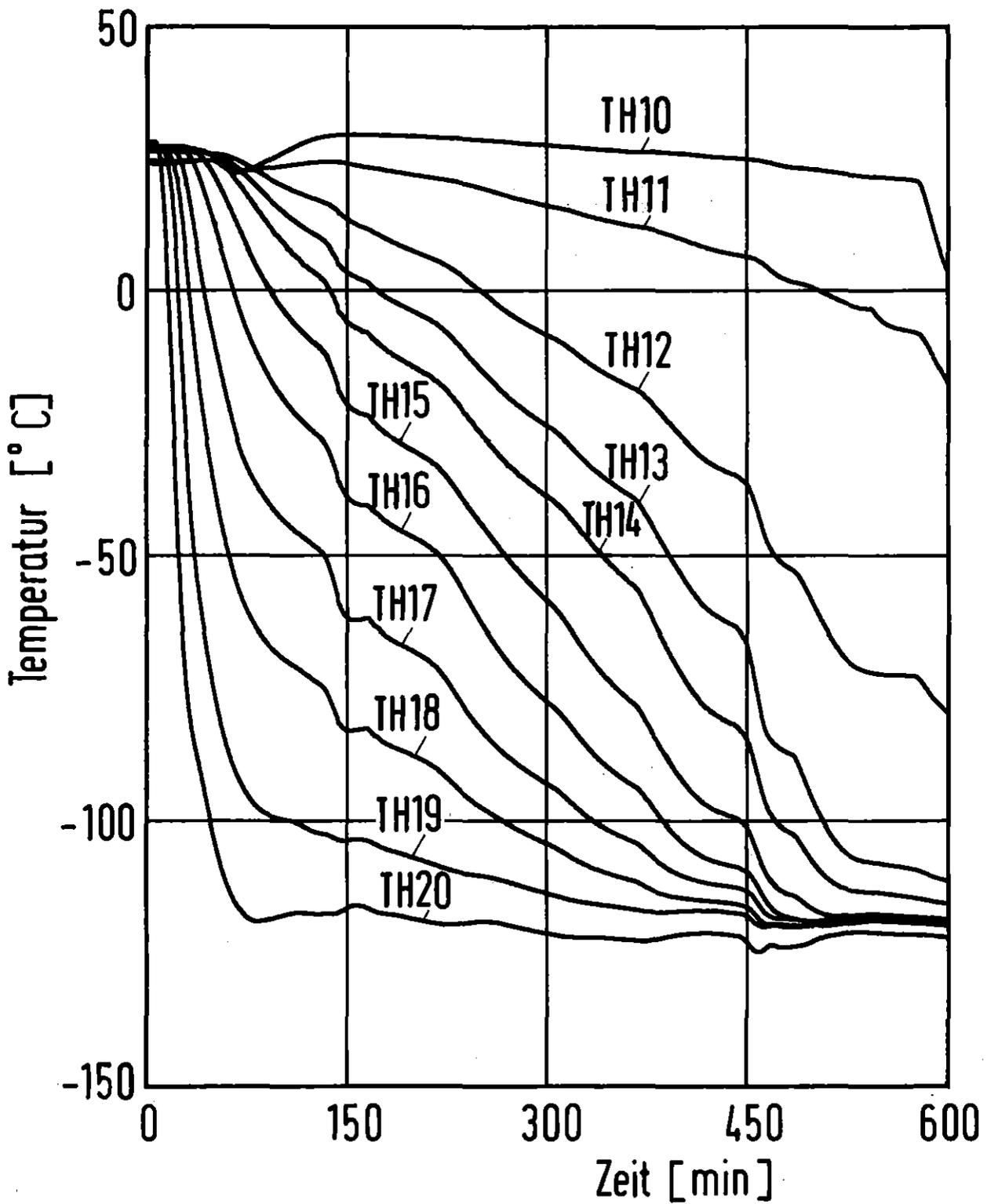


Abb.9 Zeitlicher Verlauf der Temperatur des Abscheiders an den Meßstellen TH 10-20 (vgl. Abb.5) bei Handsteuerung des Frigendurchsatzes. Für die Mitte des Gegenströmers (TH15) wurde eine lineare Temperaturabsenkung auf -120°C in der vorgesehenen Abscheidezeit von etwa 10 Stunden angestrebt.

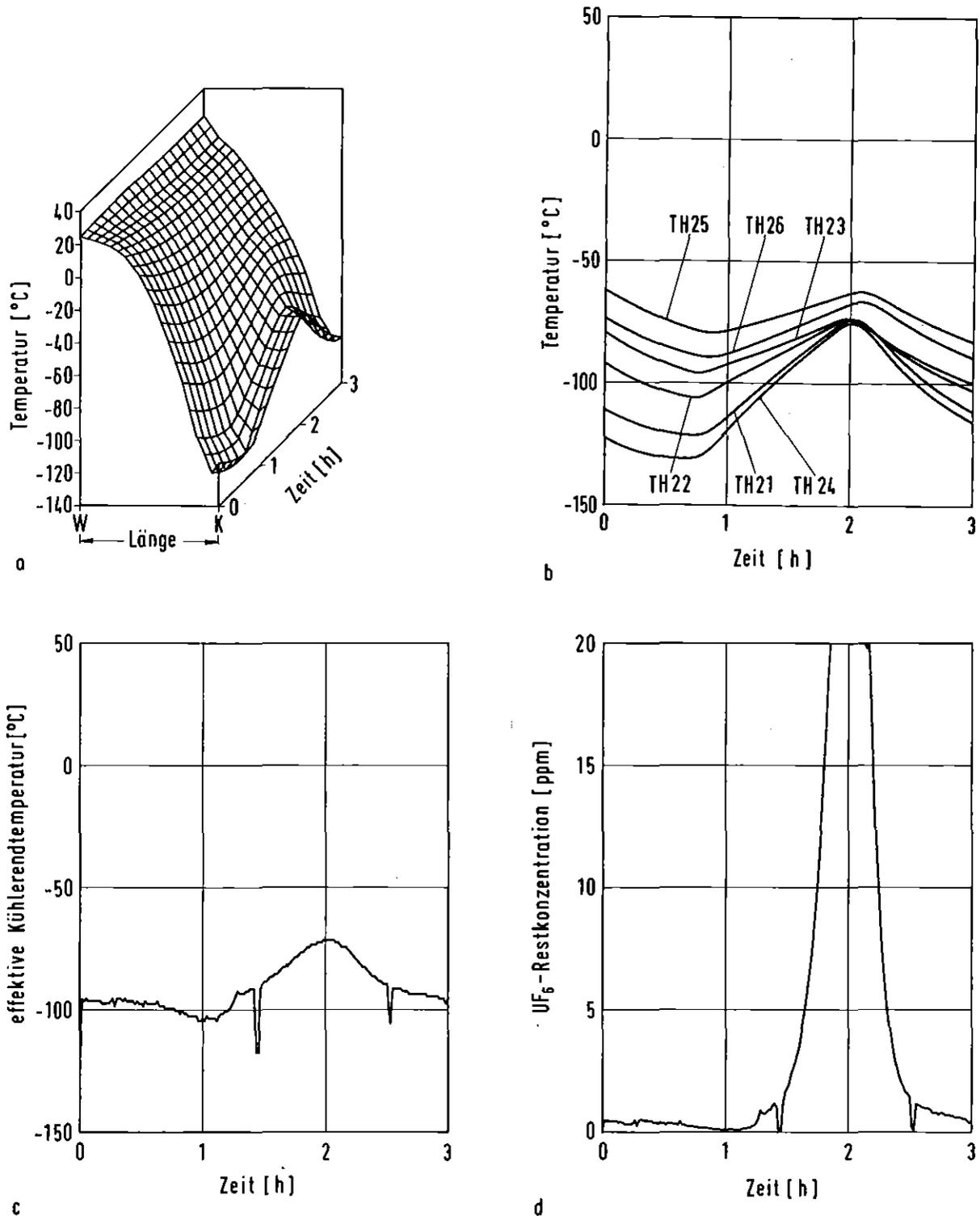


Abb.10 Temperaturverteilung im Abscheider (a und b) und UF₆-Restkonzentration (d) bei Variation der Frigentemperatur. Im Teil c der Abbildung ist die aus der UF₆-Restkonzentration über die Dampfdruckkurve des UF₆ berechnete effektive Kühlerendtemperatur aufgetragen. Die scharfen Einschnitte in den Kurven der Abbildungen c und d sind durch das Leerpumpen der Meßzelle im Rahmen der Nullpunktkontrolle bedingt (vgl. Abschnitt 4.1).

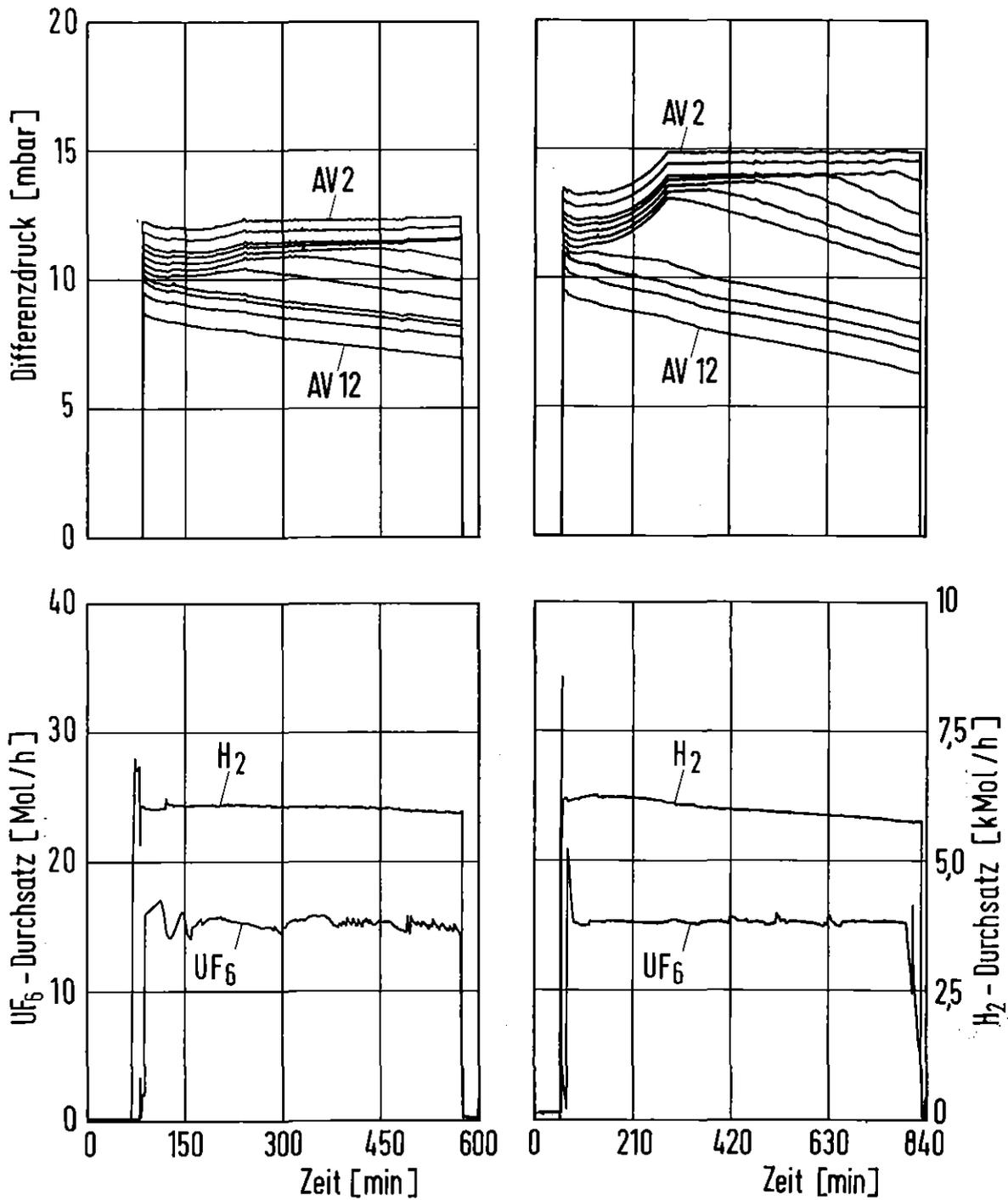


Abb.11 Zwei unter Auslegungsbedingungen durchgeführte UF_6 -Abscheidungsversuche, bei denen der zwischen dem H_2 -Austritt und dem Druckmeßstutzen AV2 (Abb.5) gemessene Differenzdruck auf verschiedenen Niveaus konstant gehalten wurde.

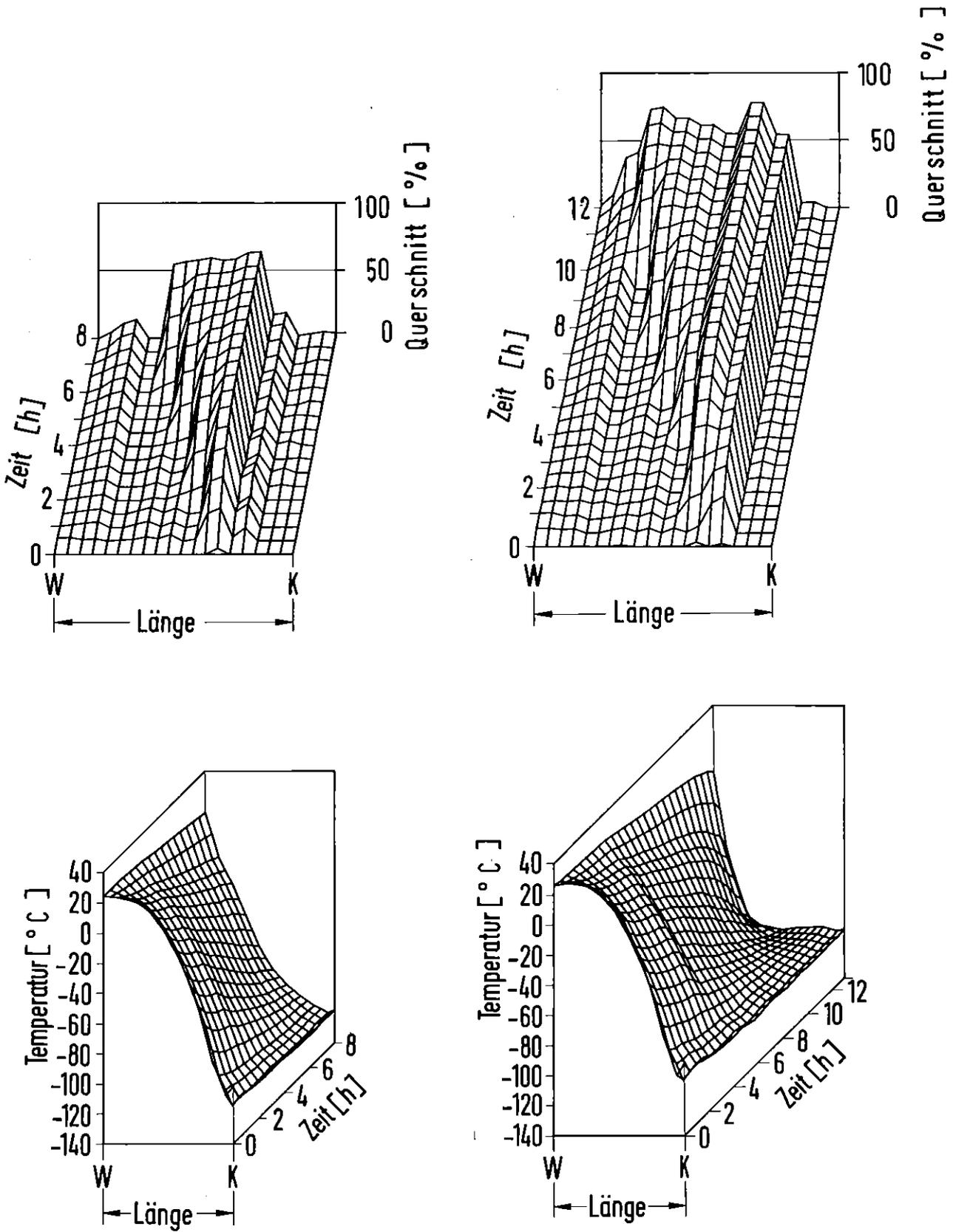


Abb.12 Räumliche Verteilung des abgeschiedenen UF_6 und der Temperatur bei den in Abb.11 dargestellten Versuchen.

(Abb.5) und dem H_2 -Austritt gemessene Differenzdruck fiel zunächst etwas ab, um dann wieder anzusteigen.

Sobald der Differenzdruck den Ausgangswert erreicht hatte, wurde beim ersten Versuch das Ventil F 7 geöffnet und der Frigendurchsatz mit F 15 (Abb.7) automatisch so gesteuert, daß der Druckabfall konstant blieb. Beim zweiten Versuch wurde der konstantzuhaltende Druck absichtlich auf einen etwas höheren Wert eingestellt. Man bemerkt, daß die Regelung des Differenzdruckes durch die automatische Steuerung des 2. Frigenstromes mit einer Fehlergrenze von weniger als $\pm 0,1$ mbar arbeitet.

Beim ersten Versuch wurden in 460 Minuten 43 kg UF_6 , beim zweiten in 750 Minuten 69,5 kg UF_6 abgeschieden, was in beiden Fällen innerhalb der Fehlergrenze dem Auslegungswert für den zu verarbeitenden UF_6 -Strom (16,0 Mol/h) entspricht. Beim zweiten Versuch wurde die vorgesehene Zykluszeit von 600 Minuten ohne erkennbare Nachteile deutlich überschritten. Aus Abb.12, die die räumliche Verteilung des abgeschiedenen UF_6 zeigt, geht hervor, daß beim zweiten Versuch auch der für die Vorkühlung des Gasgemisches vorgesehene Bereich des Abscheiders teilweise mit UF_6 gefüllt wurde.

5.3 Konstanz des Druckabfalls am Abscheider bei starken zeitlichen Schwankungen des UF_6 -Angebots

Nachdem gezeigt worden war, daß bei festen Verfahrensströmen der Differenzdruck über dem Abscheider durch Steuerung des 2. Frigenstromes konstant gehalten werden kann, wurde untersucht, wie die Regelung bei stark veränderlichen UF_6 -Strömen arbeitet.

In zwei Versuchen (Abb.13 und 14) wurde - durch den Rechner gesteuert - ein sinusförmig schwankender UF_6 -Strom in das Verfahrensgas eingespeist. Bei dem ersten Versuch entsprach der Mittelwert des UF_6 -Stromes etwa dem Auslegungswert; die Amplitude betrug $\pm 50\%$, die Periodendauer war

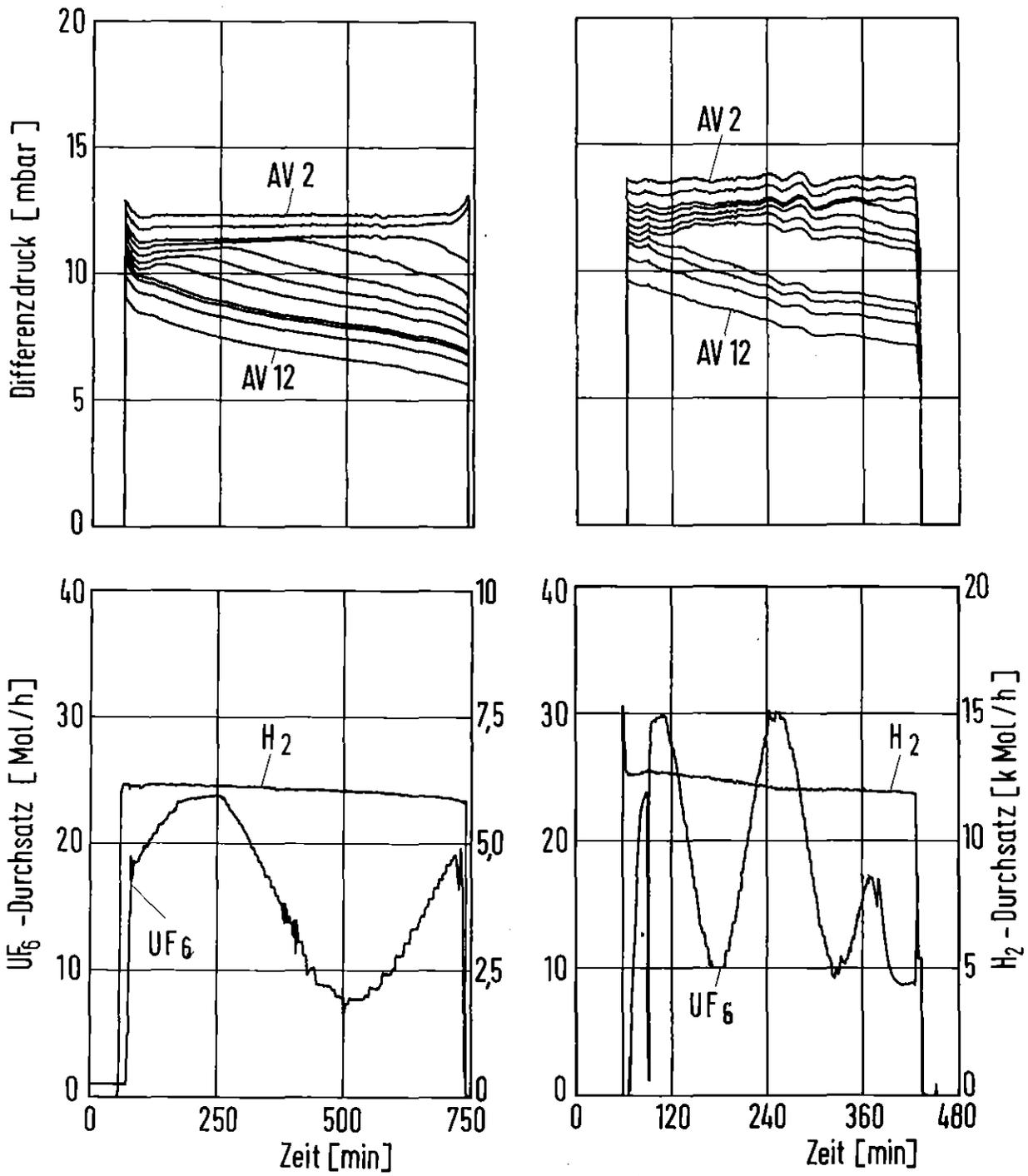


Abb.13 Nachweis der Konstanz des Differenzdruckes bei starken zeitlichen Schwankungen des UF₆-Angebots.

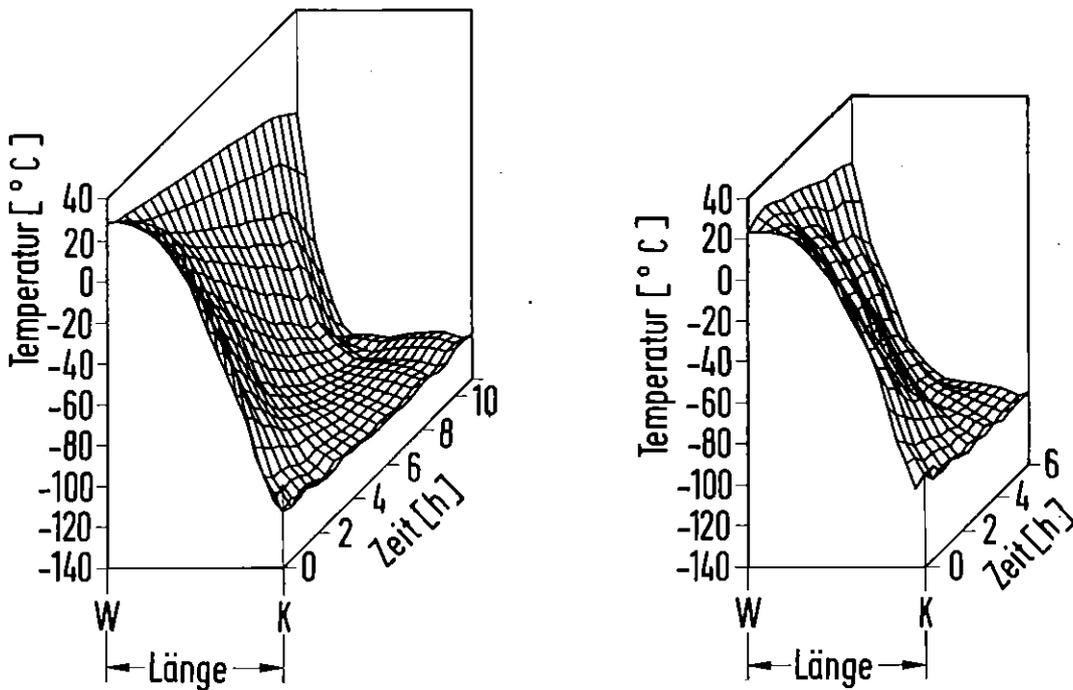
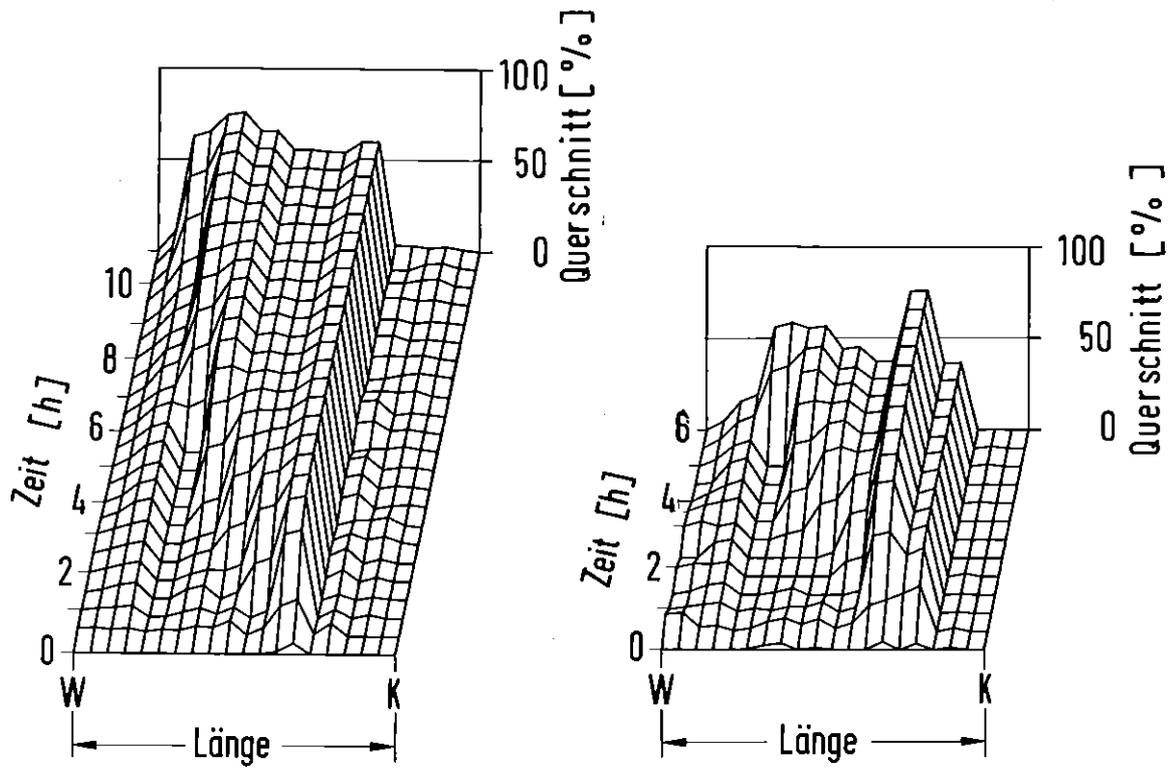


Abb.14 Räumliche Verteilung des abgeschiedenen UF_6 und der Temperatur bei den in Abb.13 dargestellten Versuchen.

600 Minuten. Bei dem zweiten Versuch wurde der Mittelwert des UF_6 -Stromes auf 20 Mol/h angehoben, die Amplitude war ebenfalls $\pm 50\%$ und die Periodendauer wurde auf 300 Minuten reduziert.

Während beim ersten Versuch die Schwankungen des Druckabfalls wieder unter $\pm 0,1$ mbar lagen, ergab sich beim zweiten ein etwas höherer, aber praktisch immer noch tragbarer Schwankungsbereich.

Abb.14 spricht dafür, daß das UF_6 beim zweiten Versuch ungleichmäßiger abgelagert wurde als beim ersten, und daß der für die Vorkühlung reservierte Bereich des Abscheiders eher vom UF_6 erreicht wurde. Ob dafür Umschichtungsprozesse verantwortlich zu machen sind, wie sie bei starken zeitlichen Konzentrationsänderungen grundsätzlich zu erwarten sind, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht mehr geklärt werden.

6. Diskussion der Ergebnisse

Bei den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuchen konnte sowohl die vorgesehene UF_6 -Beladung als auch die angestrebte UF_6 -Endkonzentration erreicht werden. Das ist bemerkenswert, da der Abscheidvorgang wegen der zahlreichen Druckmeßanschlüsse und des relativ kleinen Verhältnisses von Volumen zu Oberfläche des benutzten Gegenströmers unter erheblich ungünstigeren Randbedingungen ablief als bei der vorgesehenen technischen Anwendung.

In einer industriellen Anlage sollen mehrere entsprechend Abb.15 parallel geschaltete Tieftemperaturabscheider zeitlich versetzt so betrieben werden, daß die Rückwirkungen der Umschaltvorgänge auf die Vorabscheidungstrennstufe möglichst gering sind. Abb.16 zeigt den zeitlichen Ablauf der Betriebsphasen von sieben Tieftemperaturabscheidern, wie sie für die Vorlaufkaskade /3/ vorgesehen sind.¹³⁾

¹³⁾ Jeder Abscheider besteht aus 2 parallel geschalteten Blöcken mit der 7-fachen Kapazität des in der vorliegenden Arbeit benutzten Abscheiderblocks (vgl. Abschn. 2).

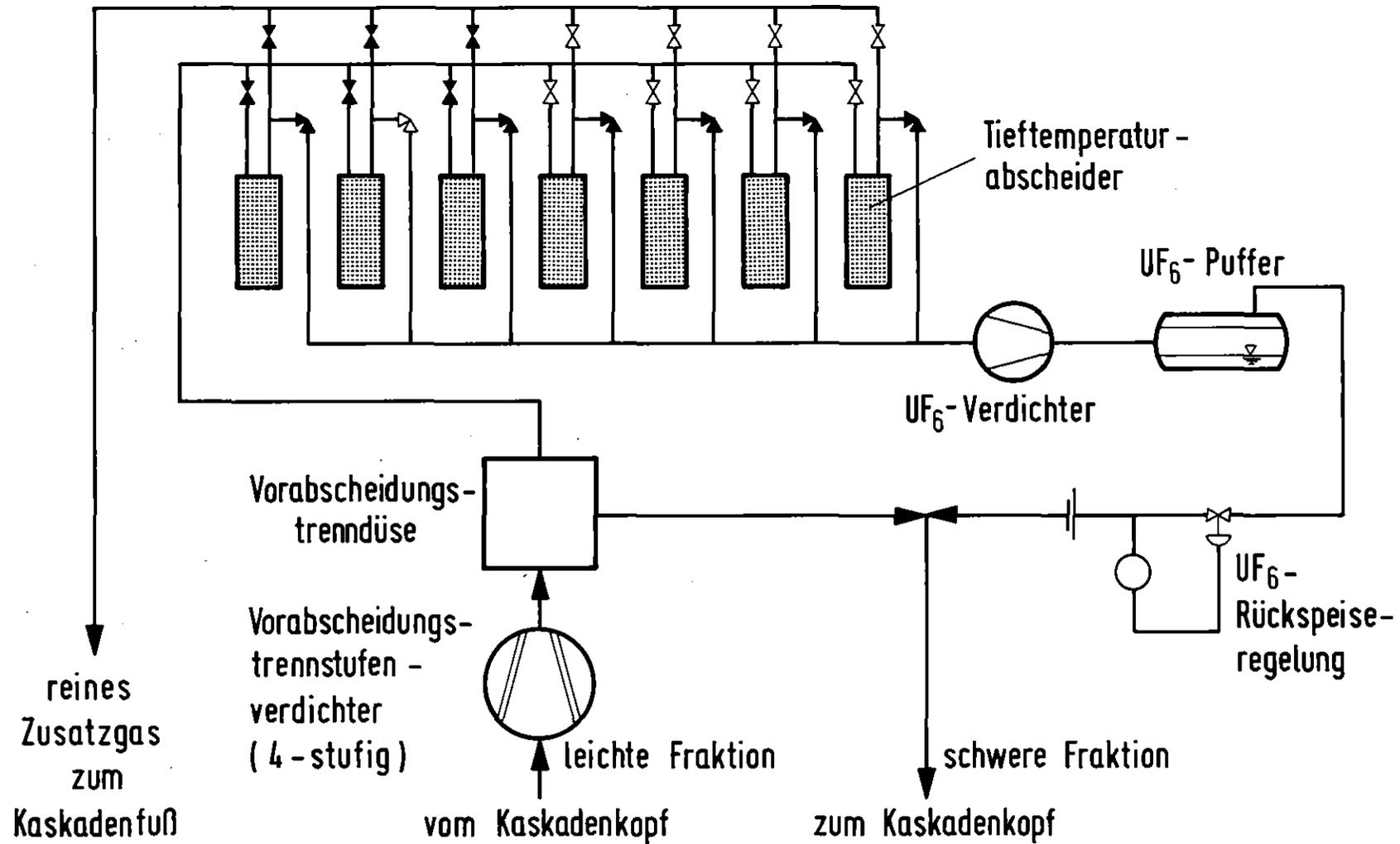


Abb.15 Kombination von Vorabscheidungs-Trennstufe und Tieftemperaturabscheidern für die Trennung von UF₆ und Zusatzgas am Kopf eines Kaskadenabschnitts einer Trenndüsenanlage.

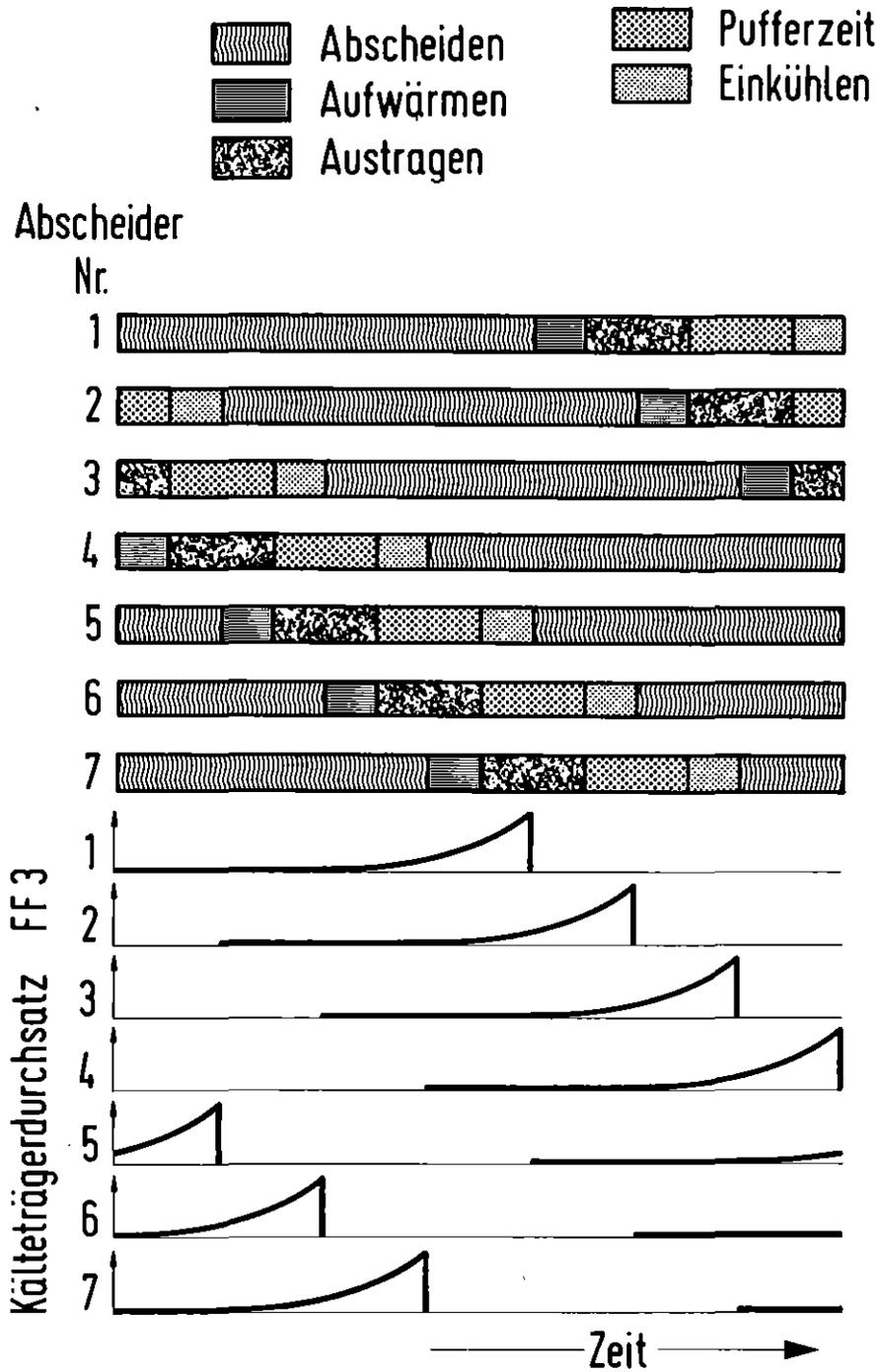


Abb.16 Zeitlicher Verlauf der Betriebsphasen von sieben Tieftemperaturabscheidern, wie sie für die Trenndüsen-Vorlaufkaskade /3/ vorgesehen sind.

Man bemerkt, daß sich jeweils vier in der Abscheidephase befinden, wobei sie gemeinsam über ihren Druckabfall den Gegendruck der Vorabscheidungstrennstufe bestimmen.

Da der Abscheidevorgang in den vier aktiven Abscheidern verschieden weit fortgeschritten ist, benötigen sie während ihrer Abscheidephasen unterschiedliche Kälteträgerdurchsätze zur Konstanthaltung ihres Druckabfalls. Da die in der früheren Arbeit /5/ vorgeschlagene individuelle Rechnersteuerung der Kälteträgerdurchsätze bei parallel geschalteten Abscheidern zu kompliziert erschien, wurde bei der Planung der Vorlaufkaskade auf eine Rechnersteuerung dieser Größen verzichtet. Stattdessen wurden für die Kälteträgerdurchsätze der einzelnen Abscheider einheitliche phasenverschobene Zeitscheibensteuerungen vorgesehen, deren Programm aufgrund des experimentell zu bestimmenden Kälteleistungsbedarfs eines mit zeitlich konstantem Gasstrom beaufschlagten Prototypabscheiders festgelegt werden soll.

Da sich bei steigendem Gegendruck der Vorabscheidungstrennstufe der an die Tieftemperaturabscheider weitergegebene UF_6 -Strom vergrößert, kann ein zufälliges UF_6 -Überangebot bei fest programmierter Kältezufuhr jedoch leicht eine Erhöhung des Druckverlustes, unter ungünstigen Umständen sogar eine Blockade der Abscheider auslösen. Aufgrund der in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse wird daher vorgeschlagen, den für die phasengerechte Aufteilung des Kältemittelstromes auf die einzelnen Abscheider zweckmäßigen Zeitscheibenbetrieb beizubehalten und mit dem gemeinsamen Druckabfall aller im Betrieb befindlichen Abscheider die Drehgeschwindigkeit der gemeinsamen Zeitscheibenachse zu regeln. Dadurch dürfte sich auf relativ einfache Weise eine optimale Ausnutzung der Abscheiderkapazität auch unter wechselnden Betriebsbedingungen erreichen lassen.

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, Ed. 6, 507 (1967). Dieser Bericht
enthält eine Zusammenfassung der früheren Veröffentlichungen
über das Trenndüsenverfahren.
- /2/ E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, K. Schubert, R. Schütte,
D. Seidel: Physics and Technology of Separation Nozzle Process.
Proceedings of the European Nuclear Conference Paris, 21-25 April
1975. Transactions of the ANS, 20, 801 (1975).
- /3/ E.W. Becker, P. Nogueira Batista, H. Völcker: Uranium Enrichment
by the Separation Nozzle Method within the Framework of German/
Brazilian Cooperation. Nuclear Technology, 52, 105 (1981).
- /4/ H.J. Fritsch, R. Schütte: Trennung von UF_6 und Zusatzgas bei
Trenndüsenanlagen mit einer Kombination von Vorabscheidungs-
Trenndüse und Tieftemperatur-Feinabscheidung. Dissertation
H.J. Fritsch, Universität Karlsruhe (1971), KfK-Bericht 1437,
Kernforschungszentrum Karlsruhe (1971).
- /5/ J. Schmid, R. Schütte: Experimentelle Untersuchungen der Tief-
temperatur-Desublimation von Uranhexafluorid aus Gemischen mit
Wasserstoff in Gegenstrom-Kompaktwärmetauschern. Dissertation
J. Schmid, Universität Karlsruhe (1976), KfK-Bericht 2428,
Kernforschungszentrum Karlsruhe (1977).
- /6/ J. Schmidt, H. Steinhaus: Unveröffentlichter Bericht des KfK (1974).

/7/ H. Steinhaus: Unveröffentlichter Bericht des KfK (1980).

/8/ H. Eisenbeis, P. Hornberger, H. Steinhaus: Unveröffentlichter Bericht des KfK (1980).