

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

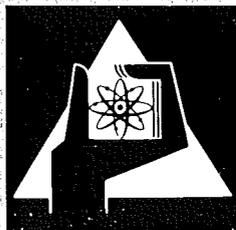
Dezember 1974

KFK 2004

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Untersuchungen mit molekular angeströmten Drucksonden  
zum Strömungsverlauf in einem Trenndüsensystem mit Nach-  
trennung der schweren Fraktion durch eine zusätzliche  
mechanische Strahlumlenkung**

W. Ehrfeld, E. Schmid



**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 2004

Institut für Kernverfahrenstechnik

UNTERSUCHUNGEN MIT MOLEKULAR ANGESTRÖMTEN DRUCKSONDEN  
ZUM STRÖMUNGSVERLAUF IN EINEM TRENNDÜSENSYSTEM MIT NACH-  
TRENNUNG DER SCHWEREN FRAKTION DURCH EINE ZUSÄTZLICHE  
MECHANISCHE STRAHLUMLENKUNG

von

W. Ehrfeld  
E. Schmid<sup>+)</sup>

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

+ ) Diplomarbeit



## Zusammenfassung:

Mit molekular angeströmten Drucksonden wurde der räumliche Verlauf der Strömung und der Gemischtrennung in einem Trenndüsensystem untersucht, bei welchem die kinetische Energie der schweren Fraktion einer ersten Düse zur Fortsetzung der Trennung in einer zweiten, unmittelbar nachgeschalteten Trenndüse ausgenutzt wird (Doppelumlenksystem). Die an He/SF<sub>6</sub>-Gemischen durchgeführten Messungen zeigen, daß die Gemischtr<sub>6</sub>rennung in der nachgeschalteten Düse bei einer Erhöhung des Einlaßdrucks oder bei einer Verkleinerung des Abschälverhältnisses der ersten Düse stark ansteigt, da aufgrund des größeren Gasdurchsatzes die Reibungseinflüsse reduziert und demzufolge höhere Geschwindigkeitsverhältnisse erreicht werden. Wird die Strömung in der nachgeschalteten Düse beidseitig durch feste Wände geführt, so ergibt sich aufgrund des Strömungswiderstands des nachgeschalteten Düsenkanals ein deutlicher Rückstau der Strömung vor dem Abschäler der ersten Düse. Ist die zweite Düse hingegen als konvergente Düse, d.h. ohne Düseninnenführung, ausgebildet, so ergeben sich am Einlauf der zweiten Düse aufgrund des geringeren Strömungswiderstandes um etwa 20 % höhere Geschwindigkeitsverhältnisse. Die geringere Rückwirkung auf die vorgeschaltete Düse sowie die besseren Absaugbedingungen bei der konvergenten Düse dürften dann insbesondere an Bedeutung gewinnen, wenn der Krümmungsradius der zweiten Düse gegenüber dem der vorgeschalteten Düse stark verkleinert wird.

## Flow Measurements in a Two Stage Separation Nozzle Using Free Molecular Pressure Probes

### Summary

Measurements of flow and demixing phenomena using free molecular pressure probes have been made in a separation nozzle system where the kinetic energy of the heavy fraction of a first nozzle is used to continue separation in a second nozzle connected directly to the first (double deflection system). Measurements carried out on He/SF<sub>6</sub>-mixtures show that there is a much stronger separation of the mixture in the downstream nozzle under condition of increased inlet pressure or decrease in the cut of the first nozzle, since due to the higher gas flow friction effects are reduced and, hence, higher speed ratios can be attained. If the flow in the downstream nozzle is ducted on both sides by stationary walls, the flow resistance of the downstream nozzle causes a marked accumulation of flow in front of the skimmer of the first nozzle. However, if the second nozzle is designed as a convergent nozzle, i.e. without an inner nozzle duct, speed ratios higher by about 20 % are found at the inlet of the second nozzle due to the lower flow resistance. The reduced effect upon the upstream nozzle and the improved suction condition in the convergent nozzle could become important, especially if the radius of curvature of the second nozzle is considerably decreased relative to that of the upstream nozzle.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	3
2. Apparatur und Versuchsdurchführung	8
2.1 Das Sondenmeßverfahren zur Untersuchung strömender Gasgemische	8
2.2 Das Doppelumlenksystem	10
2.3 Versuchsanordnung	13
3. Experimentelle Ergebnisse	15
3.1 Die Anströmung der zweiten Teildüse des Doppelumlenksystems	15
3.2 Das Strömungsfeld und der räumliche Verlauf der Entmischung in der zweiten Teildüse	19
3.2.1 Messungen am He/SF <sub>6</sub> -Gemisch	19
3.2.2 Messungen an reinem Helium	21
3.3 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Strömung und die Entmischung	24
3.3.1 Einfluß des Abschälverhältnisses der ersten Düse	24
3.3.2 Einfluß des Einlaßdrucks	27
3.3.3 Einfluß des Expansionsverhältnisses	32
3.3.4 Vergleich zwischen kanalförmiger und konvergenter Düse	32
4. Diskussion der Ergebnisse	38

## 1. Einleitung

Beim Trenndüsenverfahren<sup>1)</sup> zur Anreicherung von Uran 235 beruht die Entmischung der Uranisotope auf der Massenabhängigkeit der Zentrifugalkraft in einer schnellen gekrümmten Strömung, die durch die Expansion eines Gemisches aus Uranhexafluorid und einem leichten Zusatzgas in einer schlitzförmigen Umlenkdüse erzeugt wird. Die Beimischung des leichten Zusatzgases zum  $UF_6$  bewirkt eine Steigerung der Isotopenentmischung, da zum einen die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und zum andern die Ausbildung einer Zone mit hoher  $UF_6$ -Konzentration am Rande des Zentrifugalfeldes verzögert wird<sup>2)</sup>.

Die bisher verwendete Trenndüsenanordnung ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Wie aus Strömungsmessungen an

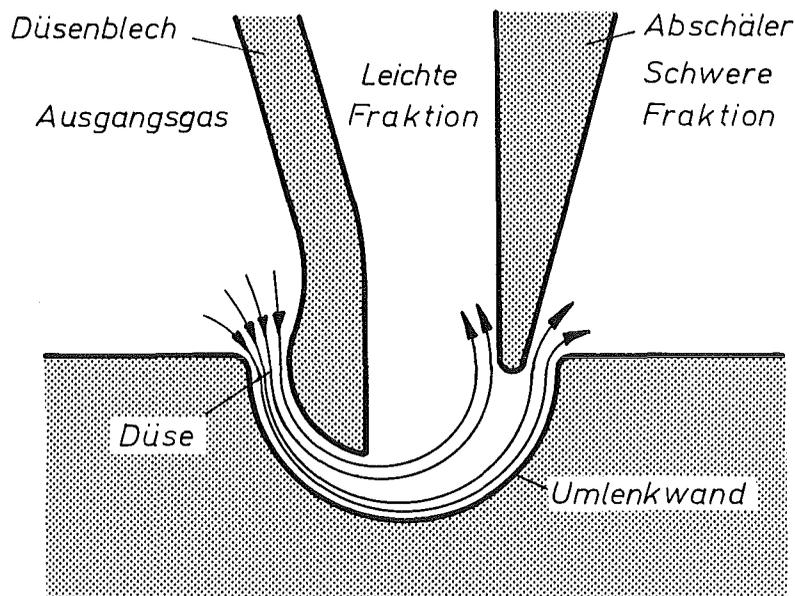


Abb. 1: Schnitt durch eine schlitzförmige Trenndüse mit schematischer Darstellung der Stromlinien

- 1) E.W. Becker, K. Bier, W. Bier, R. Schütte, D. Seidel, Angew. Chemie, Intern. Edition 6, 507 (1967). Diese Arbeit enthält eine Zusammenstellung früherer Veröffentlichungen über das Trenndüsenverfahren
- 2) E.W. Becker, W. Bier, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß, Z. Naturforschung 26a, 1377 (1971)

dieser Anordnung hervorgeht, besitzt die Trenndüsenströmung am Ende der Umlenkung noch eine beträchtliche kinetische Energie, die in den Absaugkanälen für die leichte und die schwere Fraktion nutzlos dissipiert wird<sup>3)4)5)</sup>. Da der Massenstrom durch die Düse vor allem vom  $UF_6$  getragen und der Hauptteil des  $UF_6$  mit der schweren Fraktion abgeführt wird, wird die restliche kinetische Energie der Strömung vorwiegend im Absaugkanal der schweren Fraktion dissipiert.

Die kinetische Energie der schweren Fraktion kann zu einer weiteren Trennung genutzt werden, wenn man diesen Teilstrom unmittelbar nach der Aufteilung durch den Abschäler erneut umlenkt und weiter aufteilt, wie dies in Abb. 2 schematisch dargestellt ist. Trennversuche mit  $UF_6$

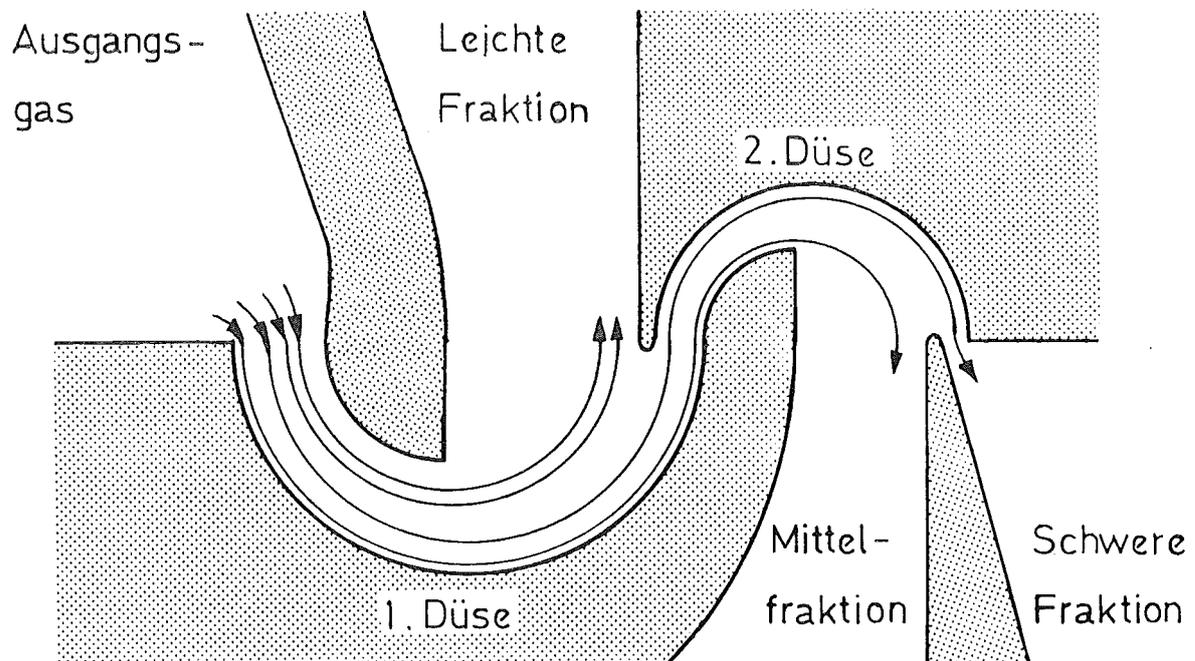


Abb. 2: Schematische Darstellung des Doppelumlenk-Trenndüsen-systems, bei welchem die schwere Fraktion einer ersten Teildüse in einer nachgeschalteten zweiten Teildüse eine weitere Trennung erfährt.

- 3) K. Bier, H. Brandtstädter, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld, KFK-Bericht 1440, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe 1971
- 4) P. Bley, W. Ehrfeld, KFK-Bericht 1562, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe 1972
- 5) P. Bley, R. Dürr, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß, Z. Naturforschung 28a, 1273, 1973.

zeigten, daß mit einem solchen "Doppelumlenksystem" unter bestimmten Bedingungen tatsächlich höhere Trennleistungen als mit einem Einzelelement erzielt werden<sup>6)6a)</sup>. Die physikalische Interpretation der Trennversuche erweist sich jedoch als schwierig, da die zweite Düse mit einer für die Umlenkung in der zweiten Düse gegensinnigen Entmischung angeströmt wird und offensichtlich auf die Trennung in der ersten Düse zurückwirken kann.

Für die Verbesserung des Doppelumlenksystems ist eine genaue Kenntnis der Strömungsverhältnisse, insbesondere im Übergangsbereich von der ersten zur zweiten Düse, wünschenswert. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb am vergrößerten Modell eines Doppelumlenksystems Strömungsuntersuchungen mit einer molekular angeströmten Drucksonde durchgeführt. Da die zum Absaugen des Gases zur Verfügung stehende Roots-Gebläseanlage nicht korrosionsfest ist, mußte das  $UF_6$  im Arbeitsgas durch ein Modellgas ersetzt werden. Als Modellgas wurde die Verbindung  $SF_6$  gewählt. Durch Verwendung eines Massenspektrometers als Nachweisgerät für die Drucksonde ließen sich die Geschwindigkeitsverhältnisse<sup>7)</sup>, die Stromdichten und die statischen Drücke der einzelnen Gemischkomponenten ermitteln.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß bei Verzicht auf die Düseninnenführung in der zweiten Düse diese mit deutlich höherem Geschwindigkeitsverhältnis angeströmt wird und der statische Druck der schweren Fraktion vor dem Abschäler der ersten Düse wesentlich niedriger ist. Dieses Ergebnis beruht offensichtlich auf einem geringeren Strömungswiderstand dieser konvergenten zweiten Düse und damit auf einem ge-

---

6) E.W. Becker, W. Bier, P. Bley, U. Ehrfeld, W. Ehrfeld, G. Eisenbeiß, *atomwirtschaft* 18, 524 (1973)

6a) F.J. Rosenbaum, *Interne Berichte des Instituts für Kernverfahrenstechnik* (unveröffentlicht)

7) Als Geschwindigkeitsverhältnis bezeichnet man das Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zur wahrscheinlichsten thermischen Geschwindigkeit der Moleküle im Schwerpunktssystem der Strömung.

ringeren Rückstau der Strömung in der ersten Düse. Bei der Umlenkung in der konvergenten zweiten Düse nimmt das Geschwindigkeitsverhältnis allerdings schneller ab als im Fall einer kanalförmigen zweiten Düse, so daß am Ende der Umlenkung bei der konvergenten zweiten Düse sogar geringfügig niedrigere Geschwindigkeitsverhältnisse erreicht werden. Die Messungen zeigen weiter, daß die für die Umlenkung der zweiten Düse gegensinnige Entmischung von  $\text{SF}_6$  und Zusatzgas am Einlauf in die zweite Düse bei Verzicht auf eine Düseninnenführung erheblich schneller abgebaut wird als bei einer Düse mit Innenführung. Am Ende der Umlenkung in der zweiten Düse ist die Entmischung von  $\text{SF}_6$  und leichtem Zusatzgas bei der konvergenten Düse etwas höher<sup>8)</sup>.

Bei einer Vergrößerung der Abschälerweite der ersten Düse wird die zweite Düse mit nur geringfügig höherem Geschwindigkeitsverhältnis angeströmt. Der mittlere statische Druck der schweren Fraktion vor dem Abschäler der ersten Düse bleibt etwa gleich. Im ersten Drittel der Umlenkung wird das Geschwindigkeitsverhältnis durch eine Änderung der Abschälerweite kaum beeinflusst, bei großen Umlenkwinkeln hingegen werden bei der größeren Abschälerweite höhere Geschwindigkeitsverhältnisse erzielt. Die am Beginn der Umlenkung vorliegende gegensinnige Entmischung wird mit zunehmender Abschälerweite erst bei größeren Umlenkwinkeln aufgehoben. Am Beginn der Umlenkung ergibt sich also bei größerer Abschälerweite ein ungünstigeres Verhältnis von radialem Diffusionsstrom zu Massendurchsatz, da hier die Geschwindigkeitsverhältnisse für beide Abschälerweiten etwa gleich sind, der Massendurchsatz bei der größeren Abschälerweite jedoch höher ist. Im weiteren Verlauf der

---

8) Die Ergebnisse bezüglich der Gemischtrennung können allerdings nicht unmittelbar auf die Isotopentrennung übertragen werden, da die Gemischtrennung i.a. einen anderen Verlauf über dem Umlenkwinkel aufweist als die Isotopentrennung; vgl. hierzu die in Anm. 2 zitierte Arbeit.

Umlenkung wird jedoch bei größerer Abschälerweite aufgrund der höheren Geschwindigkeitsverhältnisse bzw. des höheren radialen Diffusionsstroms eine stärkere Entmischung zwischen Zusatzgas und  $\text{SF}_6$  erzielt<sup>8)</sup>.

Eine Erhöhung des Einlaßdrucks am Doppelumlenksystem führt insgesamt zu einer Steigerung der Geschwindigkeitsverhältnisse in der zweiten Düse. Es zeigt sich, daß das Maximum der Gemischtrennung in der zweiten Düse bei wesentlich höheren Einlaßdrücken erreicht wird als in der ersten Düse.

## 2. Apparatur und Versuchsdurchführung

### 2.1 Das Sondenmeßverfahren zur Untersuchung strömender Gasgemische

Das Sondenmeßverfahren zur Untersuchung strömender Gasgemische wurde bereits in früheren Arbeiten ausführlich beschrieben<sup>3)9)</sup>. Das Meßprinzip soll deshalb hier nur kurz anhand von Abb. 3 erläutert werden: Die Sonde besteht aus einem senkrecht zur Strömung ausgerichteten, einseitig abgeschlossenen Röhrchen mit einer seitlichen Öffnung. Der Außendurchmesser des Röhrchens ist klein gegen die mittlere freie Weglänge der Moleküle in der Strömung, so daß bezüglich der Sonde eine freie Molekularströmung vorliegt. Durch Drehen der Sonde um ihre Achse kann die seitliche Öffnung unter beliebigem Winkel zur Strömungsrichtung orientiert werden. Die Sonde ist an ein Massenspektrometer angeschlossen, mit welchem das in die Sonde einströmende Gasgemisch analysiert wird. Für jede Gemischkomponente wird der zugehörige Ionenstrom in Abhängigkeit vom Drehwinkel der Sonde aufgenommen.

Aus der Winkelabhängigkeit des Ionenstroms, die durch die gerichtete Bewegung der Strömung einerseits und durch die thermische Bewegung der Moleküle andererseits gegeben ist, können die lokalen Werte der Stromdichte  $j_i$  und des Geschwindigkeitsverhältnisses  $S_i$ <sup>7)10)</sup> der untersuchten Gemischkomponente  $i$  ermittelt werden; die entsprechenden Strömungsgrößen für das Gemisch ergeben sich aus den Meß-

---

9) K. Bier, H. Brandtstädter, W. Ehrfeld, Z. Angew. Physik 29, 205 (1970)

10) In Strömungsgebieten, in denen stärkere Abweichungen vom lokalen thermischen Gleichgewicht auftreten, lassen sich Effektivwerte für das Geschwindigkeitsverhältnis ermitteln; vgl. hierzu die ausführliche Diskussion in der in Anm. 3 zitierten Arbeit.

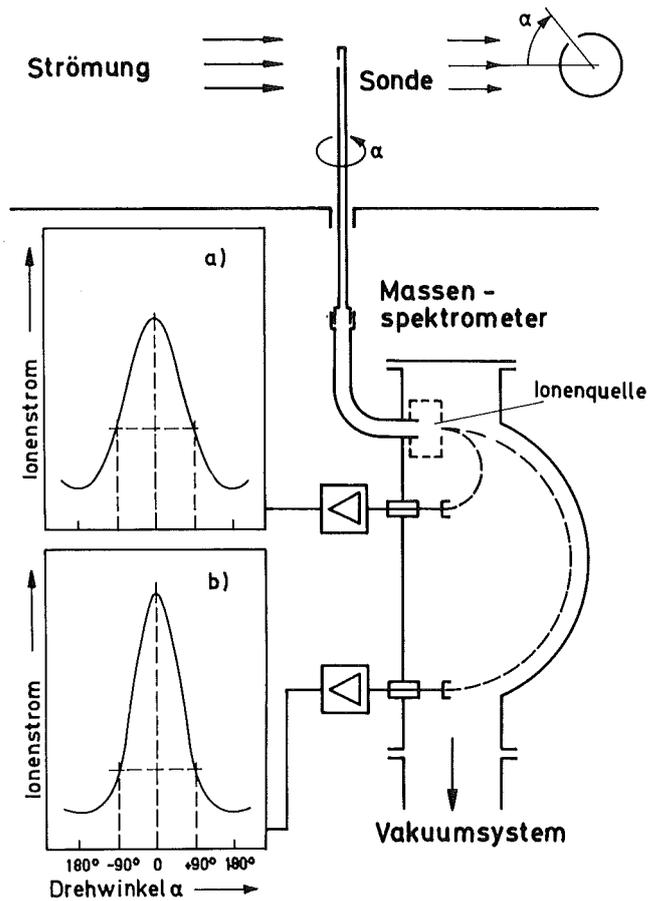


Abb. 3: Schematische Darstellung des Sondenmeßverfahrens mit Absaugung des Gasgemisches in ein Massenspektrometer mit zwei Ionenauffängern. In den beiden Diagrammen ist schematisch die Abhängigkeit des Ionenstroms vom Drehwinkel  $\alpha$  der Sonde für eine leichte Komponente (a) bzw. eine schwere Komponente (b) des strömenden Gasgemischs aufgezeichnet.

werten sämtlicher Einzelkomponenten. Aus dem Stromdichtefeld kann für jeden Ort in der Strömung das partielle Abschälverhältnis  $\vartheta_i$ , das als Verhältnis des Molstroms der Komponente  $i$  in der leichten Fraktion zum gesamten Molstrom dieser Komponente definiert ist, durch Integration über den zugehörigen Strömungsquerschnitt berechnet werden. Flächen mit konstantem Abschälverhältnis sind also identisch mit Molstromflächen im Strömungsfeld. Mit den partiellen Abschälverhältnissen  $\vartheta_L$  der leichten und  $\vartheta_S$  der schweren Gemischkomponente kann für jeden Ort in der Strömung der

Grad der Entmischung durch den lokalen Gemischtrennfaktor

$$A = \frac{\vartheta_L(1 - \vartheta_S)}{\vartheta_S(1 - \vartheta_L)}$$

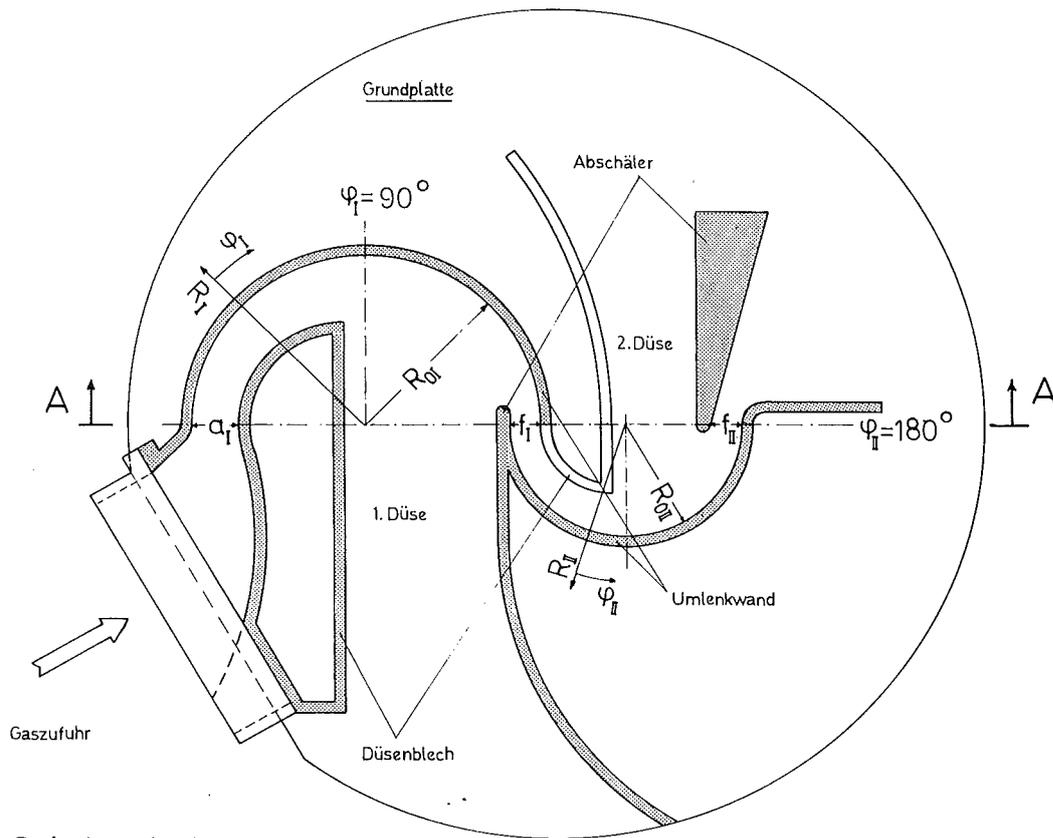
beschrieben werden.

Die bei den vorliegenden Messungen verwendete Drucksonde besteht aus einem V2A-Röhrchen von 0.4 mm Außendurchmesser und 0.2 mm Innendurchmesser, das eine seitliche Öffnung mit einem Durchmesser von 0.04 mm besitzt. Zur Gemischanalyse wurde ein magnetisches 180°-Massenspektrometer eingesetzt (Typ GD 150/4 der Fa. Varian MAT, Bremen).

Bei der Auswertung der Messungen wurde vereinfachend angenommen, daß der Ionenstrom linear vom Gaseinstrom in die Sonde abhängt. Bei hohem Gaseinstrom war dies bei der hier verwendeten Sonde für die schwere Komponente allerdings nicht mehr voll gewährleistet, da die Bedingung freier Molekularströmung innerhalb der Sonde nicht streng erfüllt war. Dies hat zur Folge, daß der Nettostrom des SF<sub>6</sub> zum Massenspektrometer durch die überlagerte He-Strömung gegenüber dem Fall freier Molekularströmung vergrößert wird. Abschätzungen zeigten jedoch, daß der durch diesen Effekt bedingte Fehler in der Bestimmung der Stromdichten und Geschwindigkeitsverhältnisse selbst im ungünstigsten Fall höchstens 5 % beträgt. Durch Verwendung von Sonden mit kleinerer Öffnung konnte dieser störende Effekt inzwischen stark reduziert werden.

## 2.2 Das Doppelumlenksystem

Abb. 4 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Doppelumlenksystems, an welchem die Drucksondenmessungen durchgeführt wurden. Umlenkände, Düsenbleche und Abschäler sind auf eine Grundplatte aufgeschraubt. Nach oben wird das Trennelement durch ein dünnes aufgeklebtes Aluminiumblech (1), in der zweiten Düse durch eine bewegliche Metallscheibe (2), welche die Verstellvorrichtung für die Drucksonde trägt, abgeschlossen. Die Sonde (3) ist drehbar in einem Schlitten (4) gelagert, der auf Führungs-



Schnitt A-A

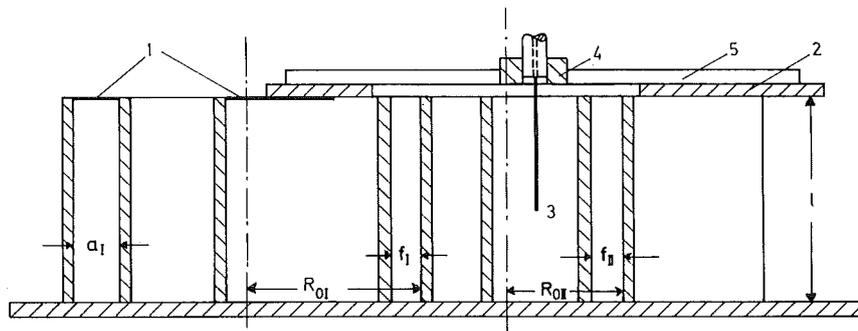


Abb. 4: Das bei den Sondenmessungen verwendete Doppelumlenksystem.

1. Düse: Umlenkradius  $R_{OI} = 100 \text{ mm}$   
 Düsenweite  $a_I = 26.6 \text{ mm}$   
 Abschälerweite  $f_I = a_{II} = 17 \text{ mm bzw. } 26.6 \text{ mm}$
2. Düse: Umlenkradius  $R_{OII} = 66 \text{ mm}$   
 Düsenweite  $a_{II} = f_I = 17 \text{ mm bzw. } 26.6 \text{ mm}$   
 Abschälerweite  $f_{II} = 17 \text{ mm}$

Schlitzlänge des Doppelumlenksystems,  $l = 150 \text{ mm}$ .  $R_I$  und  $\varphi_I$  bzw.  $R_{II}$  und  $\varphi_{II}$  bezeichnen die bei der Darstellung der Meßergebnisse verwendeten Polarkoordinaten für die erste bzw. die zweite Düse; Erläuterung der Zahlen im Text.

schiene (5) radial auf der Scheibe (2) verschiebbar ist. Die Scheibe selbst kann um ihren Mittelpunkt, der mit dem Krümmungsmittelpunkt der nachgeschalteten Düse des Doppelumlenksystems übereinstimmt, gedreht werden. Die Einstellung der Sonde erfolgt also in den in der Abbildung angegebenen Polarkoordinaten  $R_{II}$  und  $\varphi_{II}$ <sup>11)</sup>.

Das hier verwendete Trennelement stellt - abgesehen von der Schlitzlänge - eine ähnliche Vergrößerung eines Doppelumlenksystems dar, welches auch bei Trennversuchen mit  $UF_6$  eingesetzt wird<sup>6)</sup>. Die Umlenkradien des Doppelumlenksystems betragen  $R_{OI} = 100$  mm in der ersten Düse und  $R_{OII} = 66$  mm in der zweiten Düse. Die Düsenweite der ersten Düse ist auf  $a_I = 26,6$  mm eingestellt, die Düsenweite  $a_{II}$  der zweiten Düse (identisch mit der Abschälerweite  $f_I$  der ersten Düse) kann zwischen 10 und 30 mm variiert werden. Die Schlitzlänge des Trennelements beträgt  $l = 150$  mm<sup>12)</sup>. Bei einem Teil der Messungen ist die nachgeschaltete Düse nicht kanalförmig, sondern als konvergente Düse ohne Düseninnenführung ausgebildet, das Doppelumlenksystem besitzt dabei die in Abb. 4 punktiert eingezeichnete Form.

Die Abmessungen des Trennelements ergaben sich aus der Forderung, daß bei der charakteristischen Knudsen-Zahl der Trenndüsenströmung einerseits und bei dem begrenzten Saugvermögen der vorhandenen Roots-Pumpen andererseits die Sonde annähernd molekular angeströmt werden sollte. Bei den oben genannten Abmessungen liegt der für die Trenndüsenströmung charakteristische Knudsen-Zahl-Bereich bei Einlaßdrücken zwischen 0.4 und 0.8 Torr.

---

11) Die römischen Ziffern I und II bezeichnen jeweils die erste bzw. die zweite (nachgeschaltete) Teildüse des Doppelumlenksystems.

12) Die Schlitzlänge des Doppelumlenksystems wurde gegenüber den früher mit Sonden untersuchten Einzeltrenndüsen (vgl. Anm. 3) etwa verdoppelt; um auch in der zweiten Düse den Einfluß der Grenzschichten an den seitlichen Abdeckplatten auf die Strömung gering zu halten.

### 2.3 Versuchsanordnung

Der Aufbau der gesamten Versuchsanordnung<sup>3)</sup> ist in Abb. 5 schematisch dargestellt. Das Versuchsgas wird aus Druckflaschen über ein Regelventil (6) in den Düsengasraum (7) eingelassen. Aus dem Düsengasraum strömt das Gas in das Trennelement (8), in welchem die Drucksonde (3) eingebaut ist. Die Sonde ist über einen Metallschlauch (9) an das Massenspektrometer (10) angeschlossen. Das Trennelement ist zusammen mit der Verstellvorrichtung (11) für die Sonde in der Versuchskammer (12) aufgehängt. Die Einstellung der Winkelkoordinate  $\varphi_{II}$  der Sonde im Trennelement erfolgt durch eine Drehung der Verstellvorrichtung im Lager (13). Die radiale Stellung der Sonde wird über eine Drehdurchführung (14), welche über eine Spindel den SONDENSCHLITTEN (4) antreibt, verändert. Die Drehung der im Schlitten gelagerten Sonde um ihre eigene Achse erfolgt über eine zweite Drehdurchführung (15) durch einen Schrittmotor (16), der durch einen Impulsgeber (17) angesteuert wird.

Aus dem Trennelement werden alle drei Fraktionen des Doppelumlenksystems bei gleichem Absaugdruck  $p_1$ , welcher mit Hilfe des Regelventils (18) eingestellt wird, über ein Puffervolumen (19) mit Roots-Pumpen (20) und nachgeschalteten Drehkolbenpumpen (21) abgesaugt. Das Saugvermögen des Pumpsatzes beträgt  $14.000 \text{ m}^3/\text{h}$  bei Ansaugdrücken zwischen  $5 \cdot 10^{-3}$  und 5 Torr.

Zur Messung des Einlaßdruckes  $p_0$  und des Absaugdruckes  $p_1$  sowie zur Eichung der Sondenmeßanordnung werden Membranmikromanometer (Typ 77 Baratron der Fa. MKS Instruments Inc., Burlington, Mass. USA) verwendet. Die Temperatur  $T_0$  im Düsengasraum wird mit einem Platinwiderstandsthermometer bestimmt.

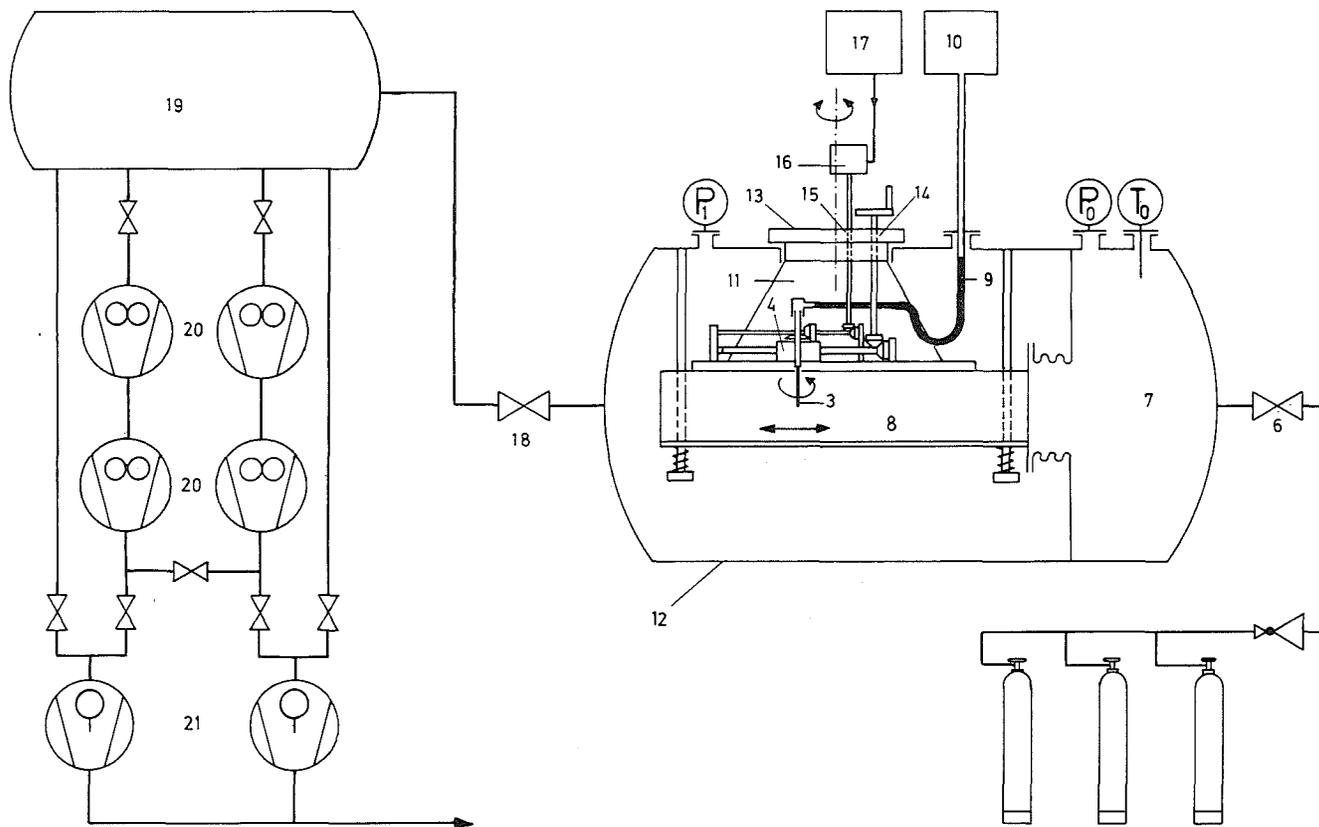


Abb. 5: Schema der Versuchsanordnung für die Sondenmessungen am Doppelumlenksystem. Erläuterung der Zahlen im Text.

### 3. Experimentelle Ergebnisse

Bei der Untersuchung der Strömungs- und Entmischungsvorgänge im Doppelumlenksystem wurde als Versuchsgas ein He/SF<sub>6</sub>-Gemisch mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub> verwendet. Zu Vergleichszwecken wurden außerdem Messungen mit reinem Helium durchgeführt. Die Messungen erfolgten in radialen Querschnitten des Trennelements bei den Umlenkwiukeln  $\varphi_{II} = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  und  $170^\circ$  in der zweiten Teildüse sowie beim Umlenkwinkel  $\varphi_I = 170^\circ$  in der ersten Teildüse. Die Abschälerweite der ersten Düse wurde auf  $f_I = 17$  mm bzw.  $f_I = 26.6$  mm eingestellt, um den Einfluß des Abschälverhältnisses  $\mathcal{S}_I$  in der ersten Düse auf das Verhalten der Strömung in der zweiten Düse zu erfassen.

#### 3.1 Die Anströmung der zweiten Teildüse des Doppelumlenk-systems

Die bei früheren Sondenmessungen an Einzeltrenndüsen gewonnenen Ergebnisse können nur qualitativ auf die Strömungsverhältnisse in der ersten Teildüse des Doppelumlenk-systems übertragen werden, da sich diese von den früher untersuchten Trenndüsen in der Schlitzlänge, den Absaugbedingungen und insbesondere in der Form des Abschälers unterscheidet<sup>12)13)</sup>. Um die Anströmung der nachgeschalteten Düse quantitativ zu erfassen, wurde der Strömungsquerschnitt beim Umlenkwinkel  $\varphi_I = 170^\circ$ , also unmittelbar vor dem Abschäler der ersten Düse, ausgemessen. Beim Doppelumlenk-system mit kanalförmiger zweiter Düse wurden die Versuche sowohl für die Abschälerweite  $f_I = 17$  mm als auch für  $f_I = 26.6$  mm, beim System mit konvergenter zweiter Düse nur für  $f_I = 26.6$  mm durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen, bei denen der Einlaßdruck

---

13) Bei den Messungen an Einzeltrenndüsen wurde ein keilförmiger Abschäler mit scharfer Schneide verwendet, während beim Doppelumlenk-system ein abgerundeter Abschäler eingesetzt ist (vgl. Abb. 4).

auf  $p_0 = 0.6$  Torr und das Expansionsverhältnis auf  $p_0/p_1 = 4$  eingestellt war, sind in Abb. 6 dargestellt. Hierbei sind das Geschwindigkeitsverhältnis  $S_{\text{gemI}}$  des Gemischs, die Stromdichten  $j_{iI}$  der Gemischkomponenten, die statischen Drücke  $p_{\text{statI}}$  der Gemischkomponenten sowie des Gemischs und der Gemischtrennfaktor  $A_I$  zusammen mit dem Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SI}$  der schweren Gemischkomponente über der Radialkoordinate  $R_I$  der ersten Düse aufgetragen.

Die Messungen zeigen, daß die Strömung durch den stumpfen Abschäler stark abgebremst wird und daß sich am Einlauf der zweiten Düse, d.h. zwischen Abschäler und Umlenkwand eine Strömung mit annähernd parabelförmigem Verlauf im Gemischgeschwindigkeitsverhältnis ausbildet. Bei kanalförmiger zweiter Düse beträgt bei einer Abschälerweite  $f_I = 17$  mm der Maximalwert von  $S_{\text{gem}}$  für die in die zweite Düse einströmende schwere Fraktion etwa 0.5, während sich bei  $f_I = 26.6$  mm ein maximales Gemischgeschwindigkeitsverhältnis von etwa 0.6 für die schwere Fraktion ergibt. Bei konvergenter zweiter Düse erreicht  $S_{\text{gem}}$  einen Maximalwert von etwa 0.7, was auf einen merklich geringeren Rückstau der Strömung bei dieser Düse hinweist.

Aus dem Verlauf der Stromdichten  $j_{iI}$  bzw. der Abschälverhältnisse  $\mathcal{S}_{SI}$  geht hervor, daß der  $\text{SF}_6$ -Strom durch die kanalförmige zweite Düse bei  $f_I = 17$  mm etwa 50 % und bei  $f_I = 26.6$  mm etwa 80 % des gesamten  $\text{SF}_6$ -Stroms durch die erste Düse beträgt. Bei konvergenter zweiter Düse und  $f_I = 26.6$  mm steigt der Anteil des  $\text{SF}_6$ -Stroms aufgrund des geringeren Rückstaus auf etwa 85 % an.

Der statische Druck durchläuft im Bereich der Abbremszone am Abschäler ein Maximum<sup>14)</sup>. In den Strömungsbereichen

---

14) Der statische Druck des Gemischs ist im Bereich der Abbremszone höher als an der Umlenkwand, da aufgrund der Reibungsverluste an den Strahlrändern der Gesamtdruck der Strömung in den mittleren Strahlbereichen am größten ist; vgl. hierzu die in Anm. 4 zitierte Arbeit.

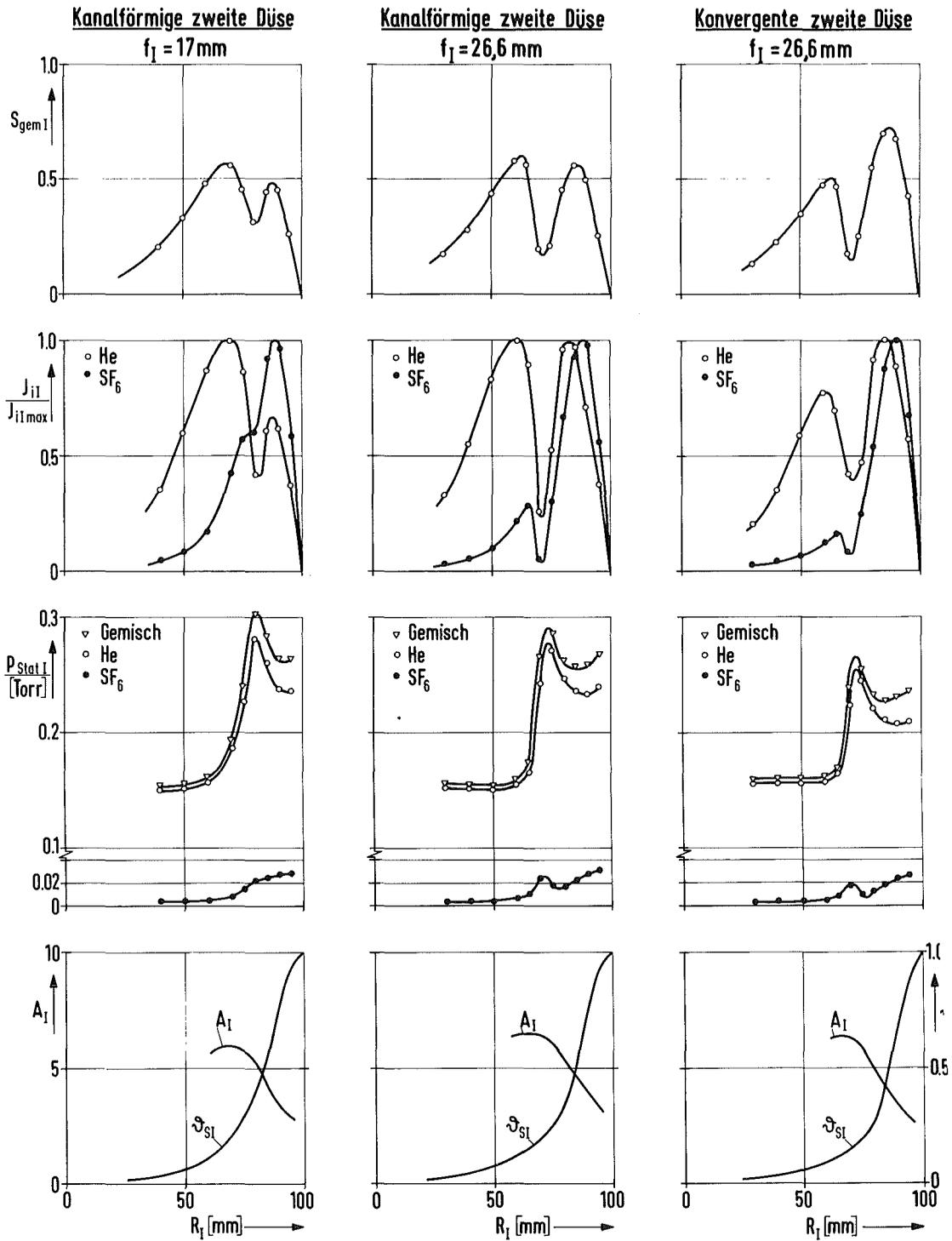


Abb. 6: Der radiale Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{\text{gemI}}$ , der auf das Maximum normierten Stromdichten  $j_{iI}/j_{iI\text{max}}$  der Gemischkomponenten, der statischen Drücke  $p_{\text{StatI}}$  der Gemischkomponenten des Gemischs, des Trennfaktors  $A_I$  und des SF<sub>6</sub>-Abschälverhältnisses  $\mathcal{D}_{SI}$  in der ersten Düse beim Umlenkwinkel  $\varphi_I = 170^\circ$  für die Abschälerweiten  $f_I = 17\text{ mm}$  und  $f_I = 26,6\text{ mm}$  bei kanalförmiger zweiter Düse sowie für  $f_I = 26,6\text{ mm}$  bei konvergenter zweiter Düse.

Versuchsbedingungen: He/SF<sub>6</sub>-Gemisch mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub>, Einlaßdruck  $p_0 = 0,6\text{ Torr}$ , Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 4$ .

nahe der Umlenk wand steigt der statische Druck des  $SF_6$  nach dem Durchlaufen des Druckmaximums zur Umlenk wand hin wieder an, während beim Helium keine nennenswerte Druckzunahme mehr erfolgt. Dieser Druckanstieg beim  $SF_6$  ist auf die Zunahme des  $SF_6$ -Molenbruchs an der Umlenk wand aufgrund der Gemischtrennung zurückzuführen. Der statische Druck des in die zweite Düse einströmenden Gasgemisches ist bei der kanalförmigen Düse sowohl bei  $f_I = 17$  mm als auch bei  $f_I = 26.6$  mm im Mittel fast doppelt so hoch wie der Absaugdruck  $p_1$ ; bei der konvergenten Düse ist der statische Druck infolge des geringeren Rückstaus nur um etwa 60 % größer als der Absaugdruck  $p_1$ .

Der radiale Verlauf des Gemischtrennfaktors  $A_I$  wird durch die unterschiedliche Stellung des Abschälers oder durch den verschieden starken Rückstau der nachgeschalteten Düse nur wenig beeinflußt. Bei konvergenter zweiter Düse, also bei geringerem Rückstau, ergeben sich bei  $SF_6$ -Abschälverhältnissen  $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.2$  etwa gleich hohe Gemischtrennfaktoren wie bei der kanalförmigen zweiten Düse, während für  $\mathcal{S}_{SI} \geq 0.2$  die Gemischtrennfaktoren bei der konvergenten Düse etwas niedriger sind.

Vergleichsmessungen, die bei einem Einlaßdruck von  $p_0 = 0.4$  Torr durchgeführt wurden, lieferten bezüglich der Anströmung der zweiten Teildüse qualitativ ähnliche Ergebnisse wie die in Abb. 6 dargestellten Messungen für  $p_0 = 0.6$  Torr. Bei der Absenkung des Einlaßdruckes von 0.6 Torr auf 0.4 Torr nimmt das Geschwindigkeitsverhältnis um 10-20 % ab, wobei gleichzeitig der Strahlquerschnitt breiter wird. Trotz der Abnahme des Geschwindigkeitsverhältnisses steigt der Gemischtrennfaktor bei der Absenkung des Einlaßdruckes noch um etwa 20 % an, was u.a. auf das günstigere Verhältnis von Diffusionsstrom zu Gasdurchsatz beim niedrigeren Druck zurückgeführt werden kann.

### 3.2 Das Strömungsfeld und der räumliche Verlauf der Entmischung in der zweiten Teildüse

#### 3.2.1 Messungen am He/SF<sub>6</sub>-Gemisch

Abb. 7 gibt einen Überblick über das Strömungsfeld und den räumlichen Verlauf der Gemischtrennung in der nachgeschalteten Düse des Doppelumlenksystems. Der Einlaßdruck des He/SF<sub>6</sub>-Gemischs mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub> betrug 0.6 Torr, das Expansionsverhältnis war 4 und die Abschälerweite der ersten Düse war auf 26.6 mm eingestellt. In den Diagrammen sind für sieben radiale Querschnitte das Gemischgeschwindigkeitsverhältnis  $S_{\text{gemII}}$ , das SF<sub>6</sub>-Geschwindigkeitsverhältnis  $S_{\text{SII}}$ , die normierten Stromdichten der Gemischkomponenten  $j_{i\text{II}}$ , der statische Druck  $p_{\text{statII}}$  des Gemischs, der Trennfaktor  $A_{\text{II}}$  und das SF<sub>6</sub>-Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{\text{SII}}$  über dem Radius  $R$  aufgetragen.

Das Strömungsprofil am Einlauf ( $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$ ) weist auf den starken Einfluß der Reibung an den Kanalwänden hin; der radiale Verlauf der Geschwindigkeitsverhältnisse  $S_{\text{II}}$  und der Stromdichten  $j_{i\text{II}}$  ist annähernd parabelförmig. Das maximale Gemischgeschwindigkeitsverhältnis beträgt etwa 0.55. Beim Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}} = 30^\circ$  beobachtet man eine deutliche Unsymmetrie im Strömungsprofil: Der Gradient von  $S_{\text{II}}$  und  $j_{i\text{II}}$  in den Strömungsbereichen am Düsenblech ist wesentlich steiler als in den Bereichen an der Umlenkwand, was auf den stärkeren Druckabfall und die hieraus resultierende Beschleunigung der Strömung am Düsenblech zurückzuführen ist. Bis zum Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}} = 60^\circ$  bleibt das Geschwindigkeitsverhältnis annähernd konstant, um dann im Winkelbereich bei  $\varphi_{\text{II}} = 90^\circ$  bei stärkerer Abnahme des statischen Drucks noch um 10 % anzusteigen; die Strömung erfährt also eine Nachexpansion. Im Trennelementbereich stromabwärts vom Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}} = 90^\circ$  fehlt wegen der Halbzylinderform des Düsenblechs (vgl. Abb. 4) eine feste Begrenzung an der Innenseite der Strömung, und

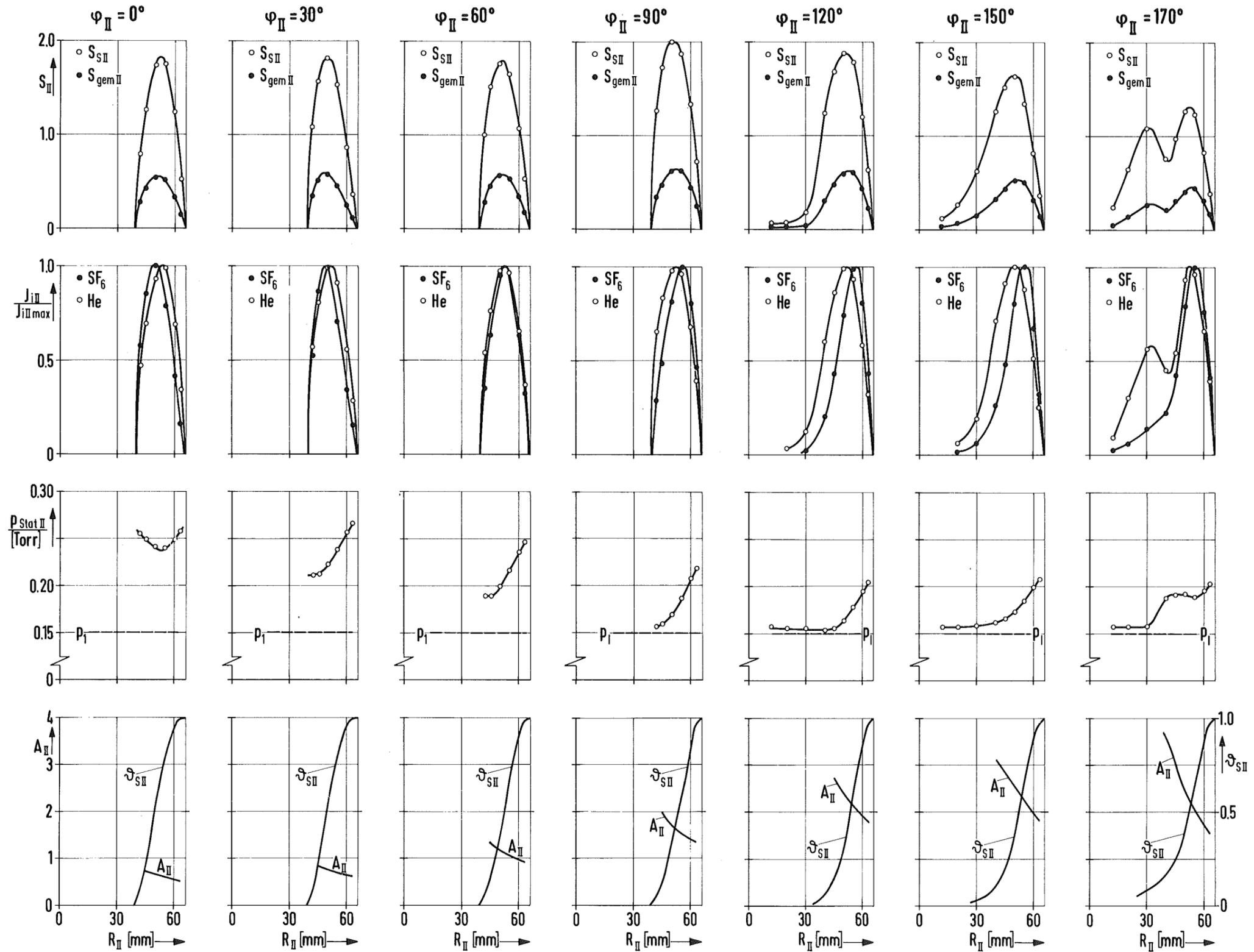


Abb.7: Der radiale Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}$ , des  $SF_6$ -Geschwindigkeitsverhältnisses  $S_{SII}$ , der auf das Maximum normierten Stromdichten  $j_{iII}/j_{iIImax}$  der Gemischkomponenten, des statischen Drucks  $p_{StatII}$  des Gemischs, des Trennfaktors  $A_{II}$  und des  $SF_6$ -Abschälverhältnisses  $\mathcal{S}_{SII}$  für verschiedene Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  in der kanal förmigen zweiten Düse bei einer Abschälweite  $f_I = 17$  mm in der ersten Düse

Versuchsbedingungen He/ $SF_6$ -Gemisch mit 4 Mol-%  $SF_6$ , Einlaßdruck  $p_o = 0,6$  Torr, Expansionsverhältnis  $p_o/p_I = 4$ .

es bildet sich eine Freistrahlgrenze aus. Mit zunehmendem Umlenkwinkel verbreitert sich der Strömungsquerschnitt stark, und für  $\varphi_{II} \geq 120^\circ$  nimmt das Geschwindigkeitsverhältnis kontinuierlich ab. Bei  $\varphi_{II} = 170^\circ$  liegen die maximalen Geschwindigkeitsverhältnisse um etwa 20 % unter den am Einlauf festgestellten Werten bzw. um etwa 30 % unter den Werten im Bereich um  $\varphi_{II} = 120^\circ$ . Bei  $\varphi_{II} = 170^\circ$  bildet sich in der Umgebung des relativ stumpfen Abschälers eine Abbremszone aus, wie dies auch in der ersten Düse festgestellt wurde (vgl. Abb. 6).

Der Gemischtrennfaktor  $A_{II}$  ist im Einlaufquerschnitt der zweiten Düse ( $\varphi_{II} = 0^\circ$ ) erwartungsgemäß kleiner als 1, d.h. die schwere Komponente ist entsprechend dem in der ersten Düse aufgebauten Molenbruchgefälle an der Umlenkwand verarmt. Erst für Umlenkwinkel  $\varphi_{II} > 60^\circ$  ist  $A_{II}$  im gesamten Strömungsquerschnitt größer als 1; die für die Stromlinienkrümmung der zweiten Düse gegensinnige Entmischung wird also erst nach einem Drittel der gesamten Umlenkung vollständig aufgehoben. Der Absolutwert von  $A_{II}$  steigt bis zum Umlenkwinkel  $\varphi_{II} \approx 150^\circ$  kontinuierlich an und erreicht für  $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$  einen Wert von 2.4. Die Zunahme von  $A_{II}$  mit dem Umlenkwinkel ist im Bereich zwischen  $\varphi_{II} = 90^\circ$  und  $\varphi_{II} = 120^\circ$ , also im Bereich der Nachexpansion, am stärksten. Zwischen  $\varphi_{II} = 150^\circ$  und  $\varphi_{II} = 170^\circ$  nimmt  $A_{II}$  für Abschälverhältnisse  $\mathcal{S}_{SII} \geq 0.3$  bereits wieder merklich ab.

### 3.2.2 Messungen an reinem Helium

Um den Einfluß der Gemischtrennung auf den Energietransport in die schwere Fraktion zu erfassen, wurden neben den Messungen mit dem He/SF<sub>6</sub>-Gemisch Messungen mit reinem Helium durchgeführt. Die Einlaßdrücke  $p_0$  für das reine Gas bzw. das Gemisch wurden dabei so eingestellt, daß

in beiden Fällen die Strömung in der ersten Düse die gleiche Reynolds-Zahl besaß<sup>15)</sup>.

Die Ergebnisse der Messungen an reinem Helium sind zusammen mit den entsprechenden Messungen am He/SF<sub>6</sub>-Gemisch in Abb. 8 dargestellt. Aufgetragen sind der radiale Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses des reinen Heliums,  $S_{\text{HeII}}$ , und des Gemischs,  $S_{\text{gemII}}$ , sowie der radiale Verlauf der statischen Drücke  $p_{\text{statII}}$  in den Strömungsquerschnitten bei den Umlenk winkeln  $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$  und  $170^\circ$ . Die Einlaßdrücke betragen  $p_0 = 0.63$  Torr für das reine Helium und  $p_0 = 0.4$  Torr für das Gemisch, das Expansionsverhältnis war  $p_0/p_1 = 3$ . Man erkennt, daß der Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses in beiden Fällen ähnlich ist. Die Absolutwerte des Geschwindigkeitsverhältnisses sind jedoch beim Gemisch aufgrund des Energietransports in die schwere Fraktion fast doppelt so groß wie die des reinen Gases. Beim reinen Gas ist überdies die relative Abnahme des statischen Drucks stärker. Diese größere Abnahme des statischen Drucks beim reinen Helium bei gleicher relativer Abnahme des Geschwindigkeitsverhältnisses ist darauf zurückzuführen, daß die Reynolds-Zahl der in die zweite Düse eintretenden Gasströmung beim reinen Gas wesentlich geringer ist als beim Gemisch und die Reibungsverluste sich stärker auswirken.

---

15) Es ist hier zu berücksichtigen, daß sich bei gleicher Reynolds-Zahl der Strömung nur annähernd ähnliche Strömungsverhältnisse in der ersten Düse für das reine Gas und das Gasgemisch einstellen, da durch die Gemischtrennung zusätzliche Strömungsverluste verursacht werden; vgl. hierzu die in den Anm. 4 und 5 zitierten Arbeiten.

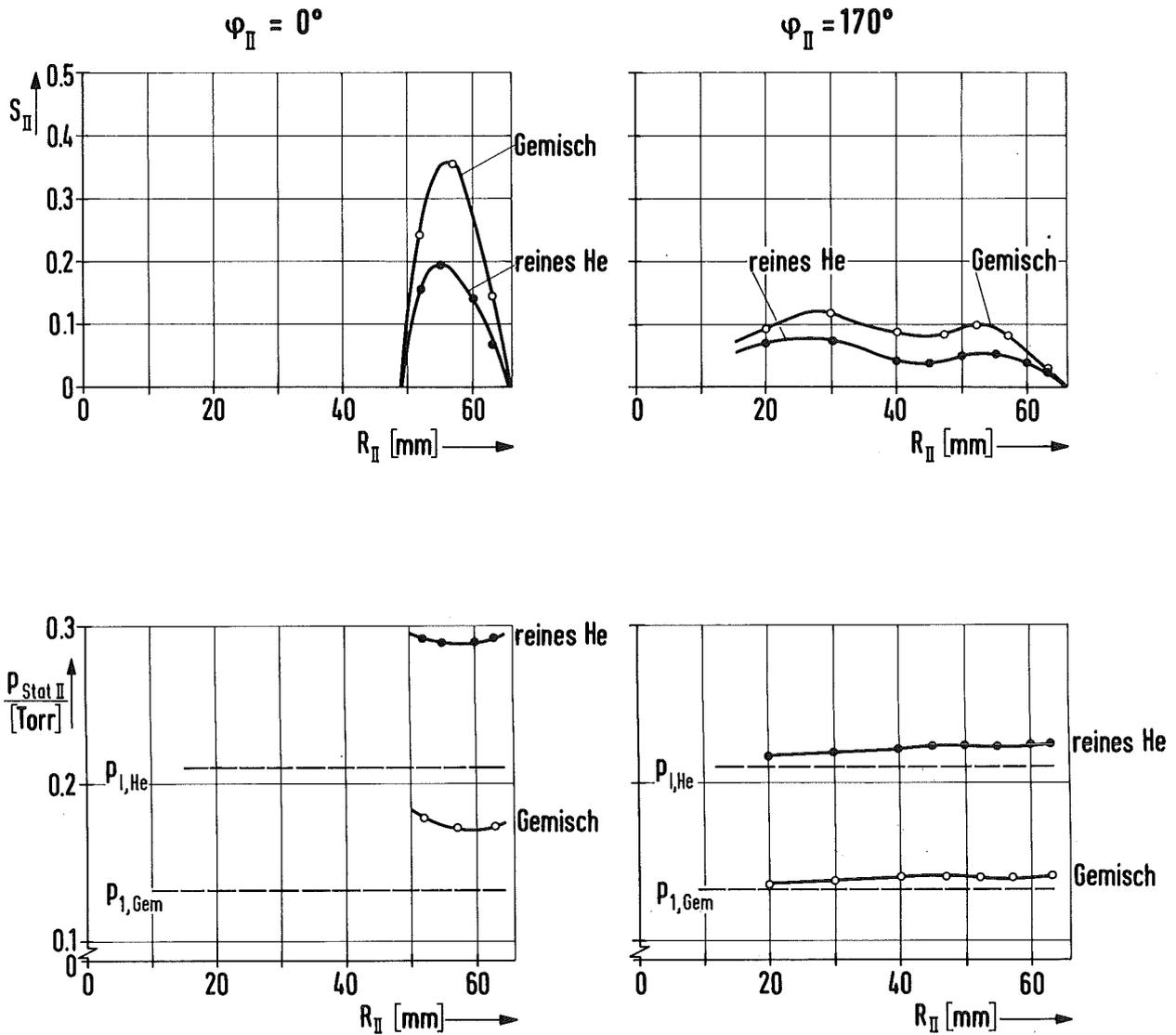


Abb. 8: Vergleich der Geschwindigkeitsverhältnisse  $S_{II}$  und der statischen Drücke  $p_{stat II}$  in der kanalförmigen zweiten Düse für reines Helium und für ein  $He/SF_6$ -Gemisch mit 4 Mol-%  $SF_6$  bei jeweils gleicher Reynolds-Zahl der Strömung in der ersten Düse für die Umlenkwinkel  $\varphi_{II} = 0^\circ$  und  $170^\circ$

Versuchsbedingungen: Einlaßdrücke  $p_o = 0.63$  Torr für reines Helium und  $p_o = 0.4$  Torr für das  $He/SF_6$ -Gemisch, Expansionsverhältnis  $p_o/p_1 = 3$ , Abschalerweite  $f_I = 17$  mm.

### 3.3 Einfluß der Betriebsbedingungen auf die Strömung und die Entmischung

#### 3.3.1 Einfluß des Abschälverhältnisses der ersten Düse

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse von Messungen in der kanal-förmigen zweiten Düse, bei denen die Abschälerweite der ersten Düse auf  $f_I = 17$  mm bzw. auf  $f_I = 26.6$  mm eingestellt war. Der Einlaßdruck  $p_0$  betrug 0.6 Torr, das Expansionsverhältnis  $p_0/p_1$  war 4. Bei diesen Bedingungen ergibt sich für die erste Düse ein  $SF_6$ -Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.5$  bei  $f_I = 17$  mm bzw.  $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.2$  bei  $f_I = 26.6$  mm. In der Abbildung sind über dem Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  die Maximalwerte des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}^{max}$ , der Trennfaktor  $A_{II}$  beim Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$  und die statischen Drücke an der Umlenkwand sowie am Strahlinnenrand (Düsenblech) aufgetragen.

Am Einlauf der zweiten Düse ( $\varphi_{II} = 0^\circ$ ) sind die Maximalwerte der Geschwindigkeitsverhältnisse bei  $f_I = 17$  mm und  $f_I = 26.6$  mm annähernd gleich groß;  $S_{gemII}^{max}$  beträgt hier etwa 0.55. Bis zum Umlenkwinkel  $\varphi_{II} = 60^\circ$  bleiben die Geschwindigkeitsverhältnisse in beiden Fällen etwa konstant. Stromabwärts von  $\varphi_{II} = 60^\circ$  setzt dann bei der größeren Abschälerweite eine Nachbeschleunigung ein, während bei der kleineren Abschälerweite das Geschwindigkeitsverhältnis kontinuierlich abfällt. Am Ende der Umlenkung ist das Geschwindigkeitsverhältnis für  $f_I = 26.6$  mm um mehr als 50 % höher als das für  $f_I = 17$  mm.

Der statische Druck ist bei der größeren Abschälerweite am Einlauf ( $\varphi_{II} = 0^\circ$ ) sowohl an der Umlenkwand als auch am Düsenblech höher als im Fall der kleineren Abschäler-

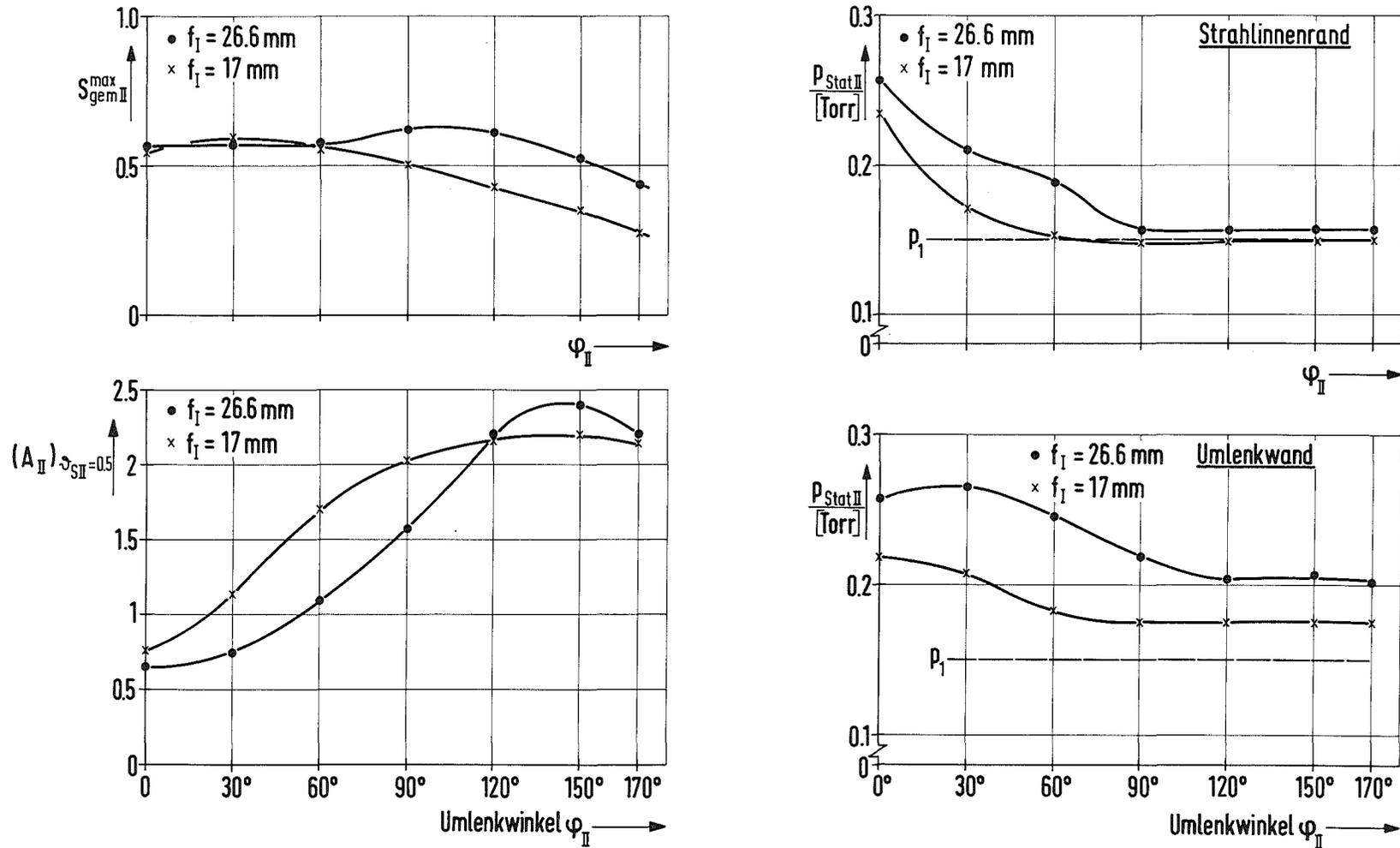


Abb. 9: Die Abhängigkeit des maximalen Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}^{max}$ , des statischen Drucks  $p_{StatII}$  des Gemischs an der Umlenkwand sowie am Strahlinnenrand (Düsenblech) und des Trennfaktors  $A_{II}$  beim Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$  vom Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  der zweiten Düse für verschiedene Abschälweiten  $f_I$  bzw. Abschälverhältnisse  $\mathcal{S}_{SI}$  der ersten Düse

Versuchsbedingungen: He/SF<sub>6</sub>-Gemisch mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub>, Einlaßdruck  $p_0 = 0.6$  Torr, Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 4$ , kanalförmige zweite Düse.

- × —  $f_I = 17$  mm ( $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.5$ )
- —  $f_I = 26.6$  mm ( $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.2$ )

weite<sup>16)</sup>. Die Druckabnahme über dem Umlenkwinkel erfolgt bei der größeren Abschälerweite langsamer<sup>17)</sup>. In der zweiten Hälfte der Umlenkung ist der radiale Druckunterschied bei  $f_I = 26.6$  mm entsprechend dem höheren Geschwindigkeitsverhältnis wesentlich größer als bei  $f_I = 17$  mm.

Das in die zweite Düse einströmende Gasgemisch weist bei der größeren Abschälerweite am Einlauf eine stärkere gegensinnige Entmischung auf. Da für beide Abschälerweiten die Geschwindigkeitsverhältnisse im ersten Drittel der Umlenkung etwa gleich hoch sind, der Gasdurchsatz jedoch für  $f_I = 26.6$  mm fast doppelt so groß ist wie bei  $f_I = 17$  mm, erfolgt die Zunahme des Gemischtrennfaktors  $A_{II}$  mit dem Umlenkwinkel im Fall der größeren Abschälerweite zunächst langsamer. Bei größeren Umlenk winkeln nimmt die Gemischtrennung bei  $f_I = 26.6$  mm aufgrund des höheren Geschwindigkeitsverhältnisses stärker zu und der Gemischtrennfaktor  $A_{II}$  wird im letzten Drittel der Umlenkung höher als bei  $f_I = 17$  mm.

---

16) Vergleicht man dieses Ergebnis mit den in Abb. 6 dargestellten Meßergebnissen zur Anströmung der zweiten Düse des Doppelumlensystems, so wird deutlich, daß im Fall der kleineren Abschälerweite im Strömungsbereich zwischen  $\varphi_F = 170^\circ$  und  $\varphi_{II} = 0^\circ$  wesentlich höhere Reibungsverluste als im Fall der größeren Abschälerweite auftreten. In beiden Fällen bleibt das Geschwindigkeitsverhältnis zwar annähernd gleich hoch, der mittlere statische Druck nimmt jedoch bei  $f_I = 17$  mm von 0.28 Torr auf 0.22 Torr ab, während bei  $f_I = 26.6$  mm der mittlere statische Druck von 0.27 Torr nur auf 0.26 Torr absinkt.

17) Aufgrund des engeren Absaugkanals zwischen Düsenblech und Abschäler der zweiten Düse bei der größeren Abschälerweite erreicht der Druck am Strahlinnenrand nicht ganz den Absaugdruck  $p_1$ .

### 3.3.2 Einfluß des Einlaßdruckes

Abb. 10a zeigt den radialen Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{\text{gemII}}$ , des Trennfaktors  $A_{\text{II}}$  und des  $\text{SF}_6$ -Abschälverhältnisses für die Einlaßdrücke  $p_0 = 0.4, 0.6$  und  $0.8$  Torr bei kanalförmiger zweiter Düse für  $f_{\text{I}} = 17$  mm bzw.  $f_{\text{I}} = 26.6$  mm im Strömungsquerschnitt bei  $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$ . Das Expansionsverhältnis war in allen Fällen auf  $p_0/p_1 = 4$  eingestellt. Abb. 10b zeigt entsprechende Messungen für den Strömungsquerschnitt bei  $\varphi_{\text{II}} = 170^\circ$ .

Bei einer Steigerung des Einlaßdrucks von  $p_0 = 0.4$  Torr auf  $0.6$  Torr nimmt das Gemischgeschwindigkeitsverhältnis  $S_{\text{gemII}}$  am Einlauf ( $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$ ) für beide Abschälerweiten  $f_{\text{I}}$  um  $25\%$  zu. Eine weitere Erhöhung des Einlaßdrucks von  $0.6$  auf  $0.8$  Torr führt nur bei  $f_{\text{I}} = 17$  mm zu einer weiteren Zunahme von  $S_{\text{gemII}}$  um etwa  $15\%$ , während bei  $f_{\text{I}} = 26.6$  mm eine geringfügige Abnahme von etwa  $5\%$  festzustellen ist. Die gegensinnige Entmischung am Einlauf ist für beide Abschälerweiten bei  $p_0 = 0.6$  Torr am stärksten, wie aus dem radialen Verlauf des Gemischtrennfaktors  $A_{\text{II}}$  hervorgeht.

Am Ende der Umlenkung ( $\varphi_{\text{II}} = 170^\circ$ ) nimmt das Geschwindigkeitsverhältnis bei den hier untersuchten Einlaßdrücken von  $0.4, 0.6$  und  $0.8$  Torr für beide Abschälerweiten mit steigendem Einlaßdruck zu. Dabei ist die relative Zunahme des Geschwindigkeitsverhältnisses mit dem Einlaßdruck am Ende der Umlenkung wesentlich stärker als am Einlauf. Beispielsweise steigt bei  $\varphi_{\text{II}} = 170^\circ$  für  $f_{\text{I}} = 17$  mm das maximale Geschwindigkeitsverhältnis bei einer Druckerhöhung von  $0.4$  auf  $0.6$  Torr um  $80\%$  an. Die aus Abb. 10b ersichtliche Zunahme von  $S_{\text{gemII}}$  mit dem Einlaßdruck  $p_0$  bzw. mit der Abschälerweite  $f_{\text{I}}$  ist u.a. dadurch bedingt, daß bei einer Vergrößerung von  $p_0$  bzw. von  $f_{\text{I}}$  der Gasdurchsatz durch die zweite Düse bzw. die Reynolds-Zahl der Strömung erhöht wird und Reibungsverluste sich dementsprechend weniger stark auswirken.

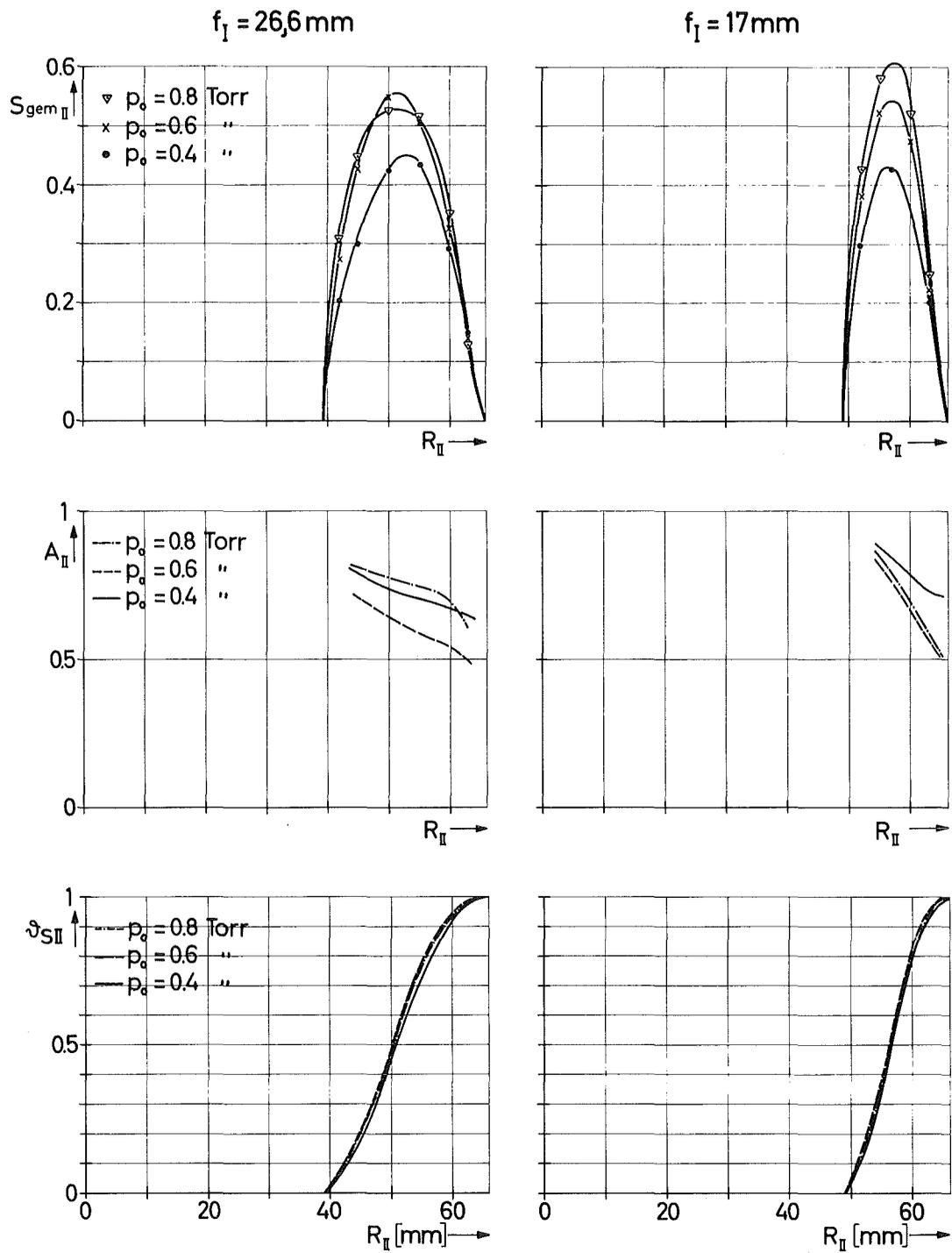


Abb. 10a: Der Einfluß des Einlaßdruckes  $p_o$  auf den radialen Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{\text{gem II}}$ , des Trennfaktors  $A_{II}$  und des  $\text{SF}_6$ -Abschälverhältnisses  $\vartheta_{\text{SII}}$  in der kanalförmigen zweiten Düse beim Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{SII}} = 0^\circ$  für verschiedene Abschälerweiten  $f_I$  der ersten Düse

Versuchsbedingungen: He/ $\text{SF}_6$ -Gemisch mit 4 Mol-%  $\text{SF}_6$ , Einlaßdrücke  $p_o = 0.4, 0.6$  und  $0.8 \text{ Torr}$ , Expansionsverhältnis  $p_o/p_I = 4$ , Abschälerweiten  $f_I = 17 \text{ mm}$  und  $f_I = 26.6 \text{ mm}$ .

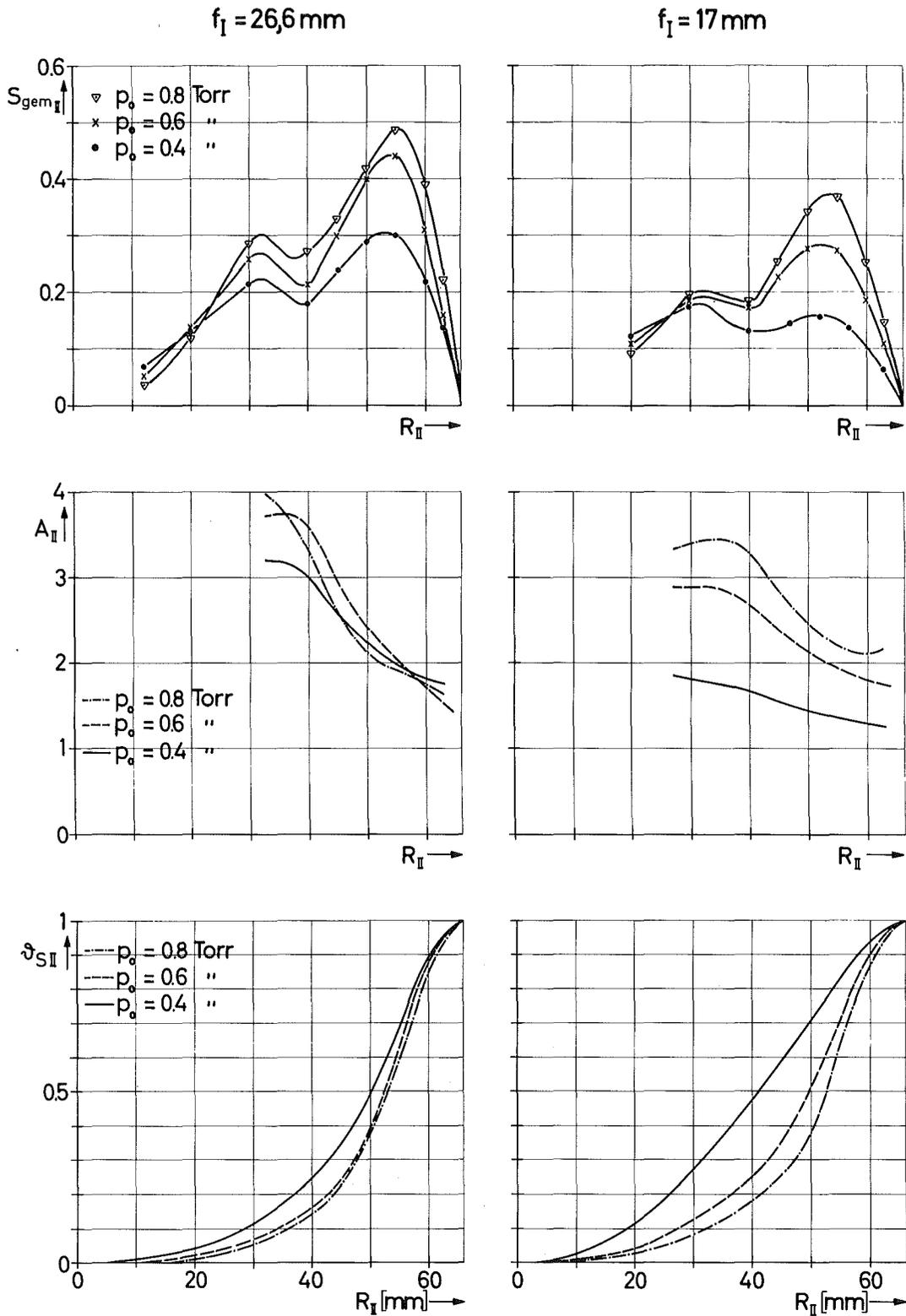


Abb. 10b: Der Einfluß des Einlaßdruckes  $p_0$  auf den radialen Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{\text{gemII}}$ , des Trennfaktors  $A_{II}$  und des  $\text{SF}_6$ -Abschälverhältnisses  $\vartheta_{\text{SII}}$  in der kanalförmigen zweiten Düse beim Umlenkwinkel  $\varphi_{II} = 170^\circ$  für verschiedene Abschälerweiten  $f_I = 26,6 \text{ mm}$  der ersten Düse  
 Versuchsbedingungen: He/ $\text{SF}_6$ -Gemisch mit 4 Mol-%  $\text{SF}_6$ , Einlaßdrücke  $p_0 = 0,4, 0,6$  und  $0,8 \text{ Torr}$ , Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 4$ , Abschälerweiten  $f_I = 17 \text{ mm}$  und  $f_I = 26,6 \text{ mm}$ .

Der am Ende der Umlenkung erreichte Gemischtrennfaktor  $A_{II}$  steigt für  $f_I = 17$  mm mit zunehmendem Einlaßdruck aufgrund der Erhöhung des Geschwindigkeitsverhältnisses deutlich an. Für  $f_I = 26.6$  mm nimmt  $A_{II}$  nur noch bei einer Erhöhung des Einlaßdrucks von  $p_0 = 0.4$  Torr auf 0.6 Torr zu. Bei  $p_0 = 0.8$  Torr ist hingegen  $A_{II}$  für Abschälverhältnisse  $0.1 \approx \mathcal{S}_{SII} \approx 0.9$  durchweg niedriger als bei  $p_0 = 0.6$  Torr; bei dem nur wenig höheren Geschwindigkeitsverhältnis für  $p_0 = 0.8$  Torr ist der radiale Diffusionsstrom nur geringfügig höher als für  $p_0 = 0.6$  Torr, so daß die Konzentrationsunterschiede in der Strömung bzw. der Trennfaktor aufgrund des höheren Gasdurchsatzes geringer werden.

Der räumliche Verlauf der Strömung und der Ablauf der Trennung über dem Umlenkwinkel bei verschiedenen Einlaßdrücken wird durch Abb. 11 veranschaulicht. Dargestellt ist hier das maximale Geschwindigkeitsverhältnis  $S_{gemII}^{max}$ , der Trennfaktor  $A_{II}$  beim Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$  und der statische Druck  $p_{statII}$  an der Umlenk wand sowie am Strahlinnenrand für die Einlaßdrücke  $p_0 = 0.4$  Torr und  $p_0 = 0.6$  Torr. Das Expansionsverhältnis betrug 4, die Abschälerweite  $f_I$  war auf 17 mm eingestellt.

Bei  $p_0 = 0.6$  Torr ist das Geschwindigkeitsverhältnis  $S_{gemII}^{max}$  für alle Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  durchschnittlich um den Betrag 0.15 höher als bei  $p_0 = 0.4$  Torr. Der zu  $p_0 = 0.6$  Torr gehörige Trennfaktor  $A_{II}$  ( $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$ ), der am Einlauf noch deutlich unter dem zu  $p_0 = 0.4$  Torr gehörigen Wert liegt, übersteigt diesen bereits bei  $\varphi_{II} \approx 30^\circ$ . Die Zunahme des Trennfaktors mit dem Umlenkwinkel ist für  $p_0 = 0.4$  Torr bereits bei  $\varphi_{II} \approx 90^\circ$  abgeschlossen, für  $p_0 = 0.6$  Torr ist noch eine deutliche Zunahme von  $A_{II}$  bis zu  $\varphi_{II} \approx 120^\circ$  zu beobachten. Der Verlauf des statischen Drucks am Strahlinnenrand und an der Umlenk wand ist für beide Einlaßdrücke ähnlich; der relative radiale Druckunterschied ist bei  $p_0 = 0.6$  Torr entsprechend dem höheren Geschwindigkeitsverhältnis größer als bei  $p_0 = 0.4$  Torr.

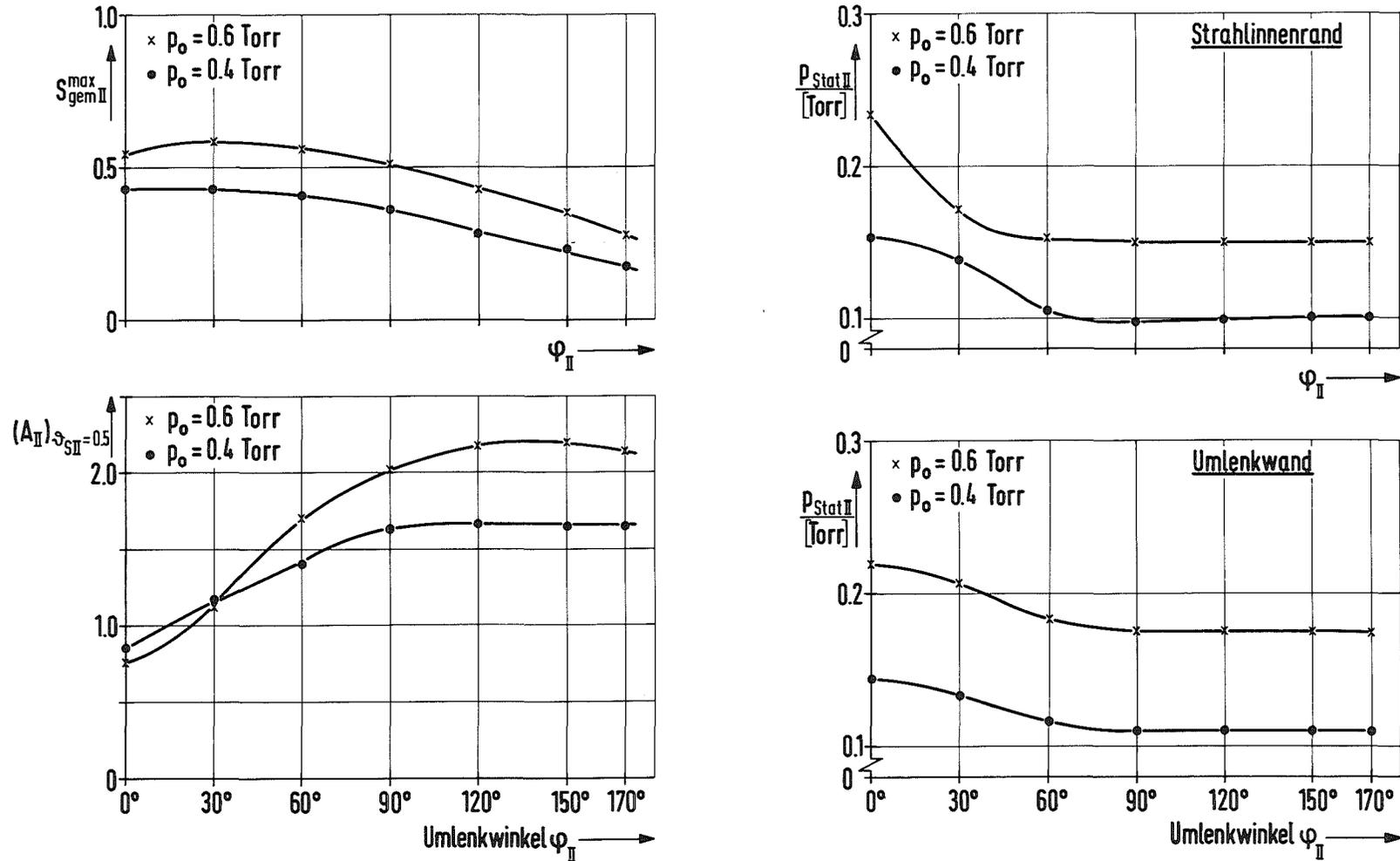


Abb. 11: Die Abhängigkeit des maximalen Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}^{max}$ , des statischen Drucks  $p_{statII}$  des Gemischs an der Umlenk wand sowie am Strahlinnenrand (Düsenblech) und des Trennfaktors  $A_{II}$  beim Abschälverhältnis  $S_{SII} = 0.5$  vom Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  für die Einlaßdrücke  $p_o = 0.4$  und  $0.6$  Torr.

Versuchsbedingungen: He/SF<sub>6</sub>-Gemisch mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub>, Expansionsverhältnis  $p_o/p_1 = 4$  kanal-förmige zweite Düse, Abschälerweite  $f_I = 17$  mm.

### 3.3.3 Einfluß des Expansionsverhältnisses

In Abb. 12 sind die Ergebnisse orientierender Messungen zum Einfluß des Expansionsverhältnisses dargestellt. Aufgetragen sind der radiale Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses  $S_{\text{gemII}}$ , des Trennfaktors  $A_{\text{II}}$  und des  $\text{SF}_6$ -Abschälverhältnisses  $\mathcal{S}_{\text{SII}}$  für die Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$  und  $170^\circ$  bei den Expansionsverhältnissen  $p_0/p_1 = 3$  und  $p_0/p_1 = 4$ . Der Einlaßdruck betrug 0.6 Torr, die Abschälerweite  $f_{\text{I}}$  war auf 17 mm eingestellt.

Beim höheren Expansionsverhältnis ist das Geschwindigkeitsverhältnis am Einlauf ( $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$ ) erwartungsgemäß nur geringfügig größer, da bei einer Erhöhung des Expansionsverhältnisses bevorzugt die Strömungsbereiche am Strahlinnenrand der ersten Düse beschleunigt werden, während die in die zweite Düse eintretenden Strömungsbereiche nur eine geringe Zunahme im Geschwindigkeitsverhältnis erfahren<sup>3)</sup>. Die gegensinnige Entmischung am Einlauf ist bei  $p_0/p_1 = 4$  deutlich stärker als bei  $p_0/p_1 = 3$ . Am Ende der Umlenkung ( $\varphi_{\text{II}} = 170^\circ$ ) steigt das Geschwindigkeitsverhältnis bei der Erhöhung von  $p_0/p_1 = 3$  auf  $p_0/p_1 = 4$  um etwa 30 % an, der Trennfaktor nimmt dabei am Strahlinnenrand von  $A_{\text{II}} \approx 2.0$  auf  $A_{\text{II}} \approx 2.8$  und an der Umlenkwand von  $A_{\text{II}} \approx 1.6$  auf  $\approx 1.8$  zu.

### 3.3.4 Vergleich zwischen kanalförmiger und konvergenter Düse

Aus den bisher gezeigten Messungen an der kanalförmigen zweiten Düse geht hervor, daß sich am Düsenblech besonders steile Geschwindigkeitsgradienten ausbilden, was zu hohen Reibungsverlusten in diesen Strömungsbereichen führt (vgl. Abschnitt 3.2.1 und Abb. 7). Durch Messungen an einem Doppelumlenksystem, bei dem die nachgeschaltete Düse als konvergente Düse ausgebildet war (vgl. Abb. 4), sollte untersucht werden, ob bei Verzicht auf eine Düsen-

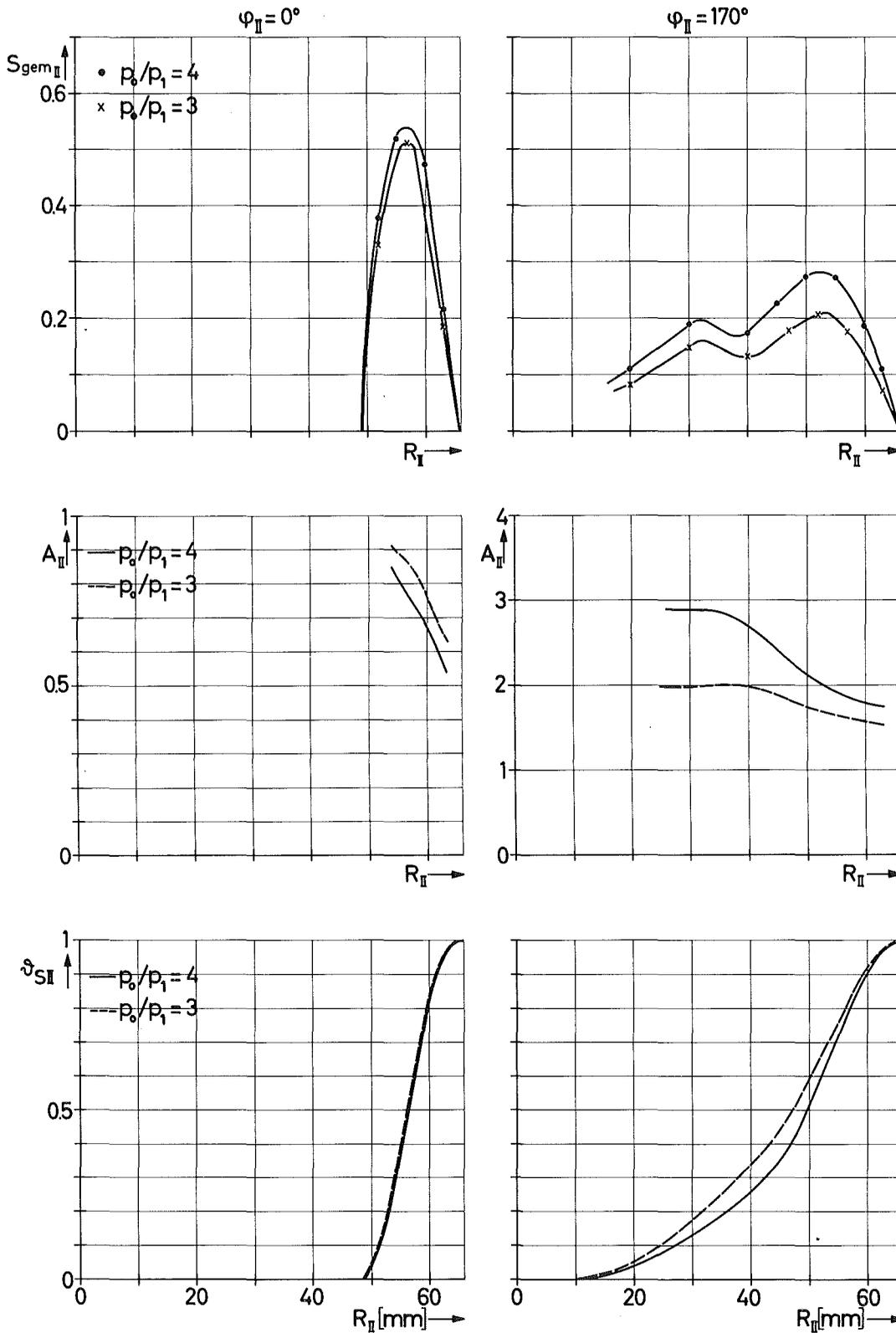


Abb. 12: Der Einfluß des Expansionsverhältnisses  $p_0/p_1$  auf den radialen Verlauf des Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}$ , des Trennfaktors  $A_{II}$  und des  $SF_6$ -Abschälverhältnisses  $S_{SII}$  in der kanalförmigen zweiten Düse bei den Umlenkwinkeln  $\varphi_{II} = 0^\circ$  und  $170^\circ$

Versuchsbedingungen: He/ $SF_6$ -Gemisch mit 4 Mol-%  $SF_6$ , Einlaßdruck  $p_0 = 0.4$  Torr, Expansionsverhältnisse  $p_0/p_1 = 3$  bzw. 4, Abschälerweite  $f_I = 17$  mm

innenführung günstigere Strömungsverhältnisse für die Trennung zu erreichen sind. Die Ergebnisse von Vergleichsmessungen an der kanalförmigen und der konvergenten Düse sind in Abb. 13 dargestellt. Aufgetragen sind das maximale Gemischgeschwindigkeitsverhältnis  $S_{\text{gemII}}^{\text{max}}$ , der Trennfaktor  $A_{\text{II}}$  ( $\mathcal{S}_{\text{SII}} = 0.5$ ) und die statischen Drücke  $p_{\text{statII}}$  an der Umlenk wand und am Strahlinnenrand über dem Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}}$ . Der Einlaßdruck des He/SF<sub>6</sub>-Gemischs mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub> betrug jeweils 0.6 Torr, das Expansionsverhältnis war 4, und die Abschälerweite  $f_{\text{I}}$  war auf 26.6 mm eingestellt.

Wie bereits nach den in Abb. 6 gezeigten Messungen zur Anströmung der zweiten Düse des Doppelumlensystems zu erwarten war, ist das Geschwindigkeitsverhältnis am Einlauf bei der konvergenten Düse deutlich höher als bei der kanalförmigen Düse. Das maximale Gemischgeschwindigkeitsverhältnis erreicht einen Wert von 0.8, während bei der kanalförmigen Düse  $S_{\text{gemII}}^{\text{max}}$  bei  $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$  etwa 0.6 beträgt. Bei der konvergenten Düse liegt der Absaugdruck bereits bei  $\varphi_{\text{II}} = 0^\circ$  am Strahlinnenrand an, was zu einer schnellen Beschleunigung der Strömung am Beginn der Umlenkung führt und was zusammen mit dem kleineren Strömungswiderstand der konvergenten Düse auch einen geringeren Rückstau der Strömung in der ersten Düse zur Folge hat. Stromabwärts vom Umlenkwinkel  $\varphi_{\text{II}} \approx 30^\circ$  nimmt das Gemischgeschwindigkeitsverhältnis bei der konvergenten Düse kontinuierlich bis auf einen Wert von 0.4 bei  $\varphi_{\text{II}} = 170^\circ$  ab. Bei der kanalförmigen Düse erfährt die Strömung im Winkelbereich von  $\varphi_{\text{II}} \approx 90^\circ$  eine Nachexpansion und das Geschwindigkeitsverhältnis ist in der zweiten Hälfte der Umlenkung deutlich höher als bei der konvergenten Düse.

Der Gemischtrennfaktor  $A_{\text{II}}$  steigt bei der konvergenten Düse am Beginn der Umlenkung aufgrund des höheren Geschwindigkeitsverhältnisses schneller an. Bei größeren Umlenkwinkeln hingegen erreicht  $A_{\text{II}}$  bei der kanalförmigen

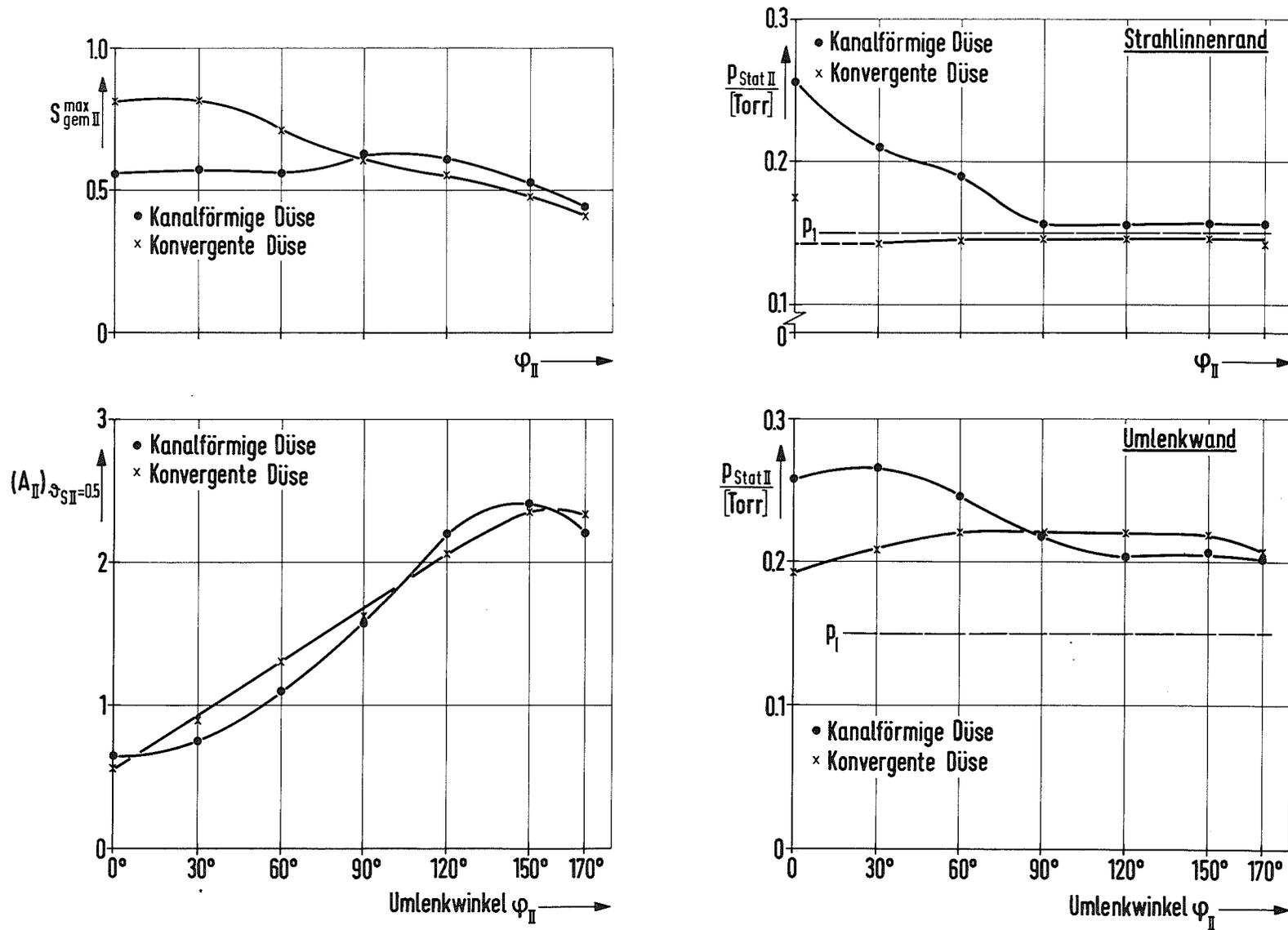


Abb. 13: Die Abhängigkeit des maximalen Gemischgeschwindigkeitsverhältnisses  $S_{gemII}^{max}$ , des statischen Drucks  $P_{StatII}$  an der Umlenk wand sowie am Strahlinnenrand (Düsenblech) und des Trennfaktors  $A_{II}$  bei Abschälverhältnis  $\mathcal{S}_{SII} = 0.5$  vom Umlenkwinkel  $\varphi_{II}$  bei einer kanalförmigen und bei einer konvergenten zweiten Düse.

Versuchsbedingungen: He/SF<sub>6</sub>-Gemisch mit 4 Mol-% SF<sub>6</sub>, Einlaßdruck  $p_0 = 0.6$  Torr, Expansionsverhältnis  $p_0/p_1 = 4$ , Abschälerweite  $f_I = 26.6$  mm ( $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.2$  bei kanalförmiger zweiter Düse und  $\mathcal{S}_{SI} \approx 0.15$  bei konvergenter zweiter Düse).

Düse aufgrund der Nachbeschleunigung der Strömung etwas höhere Werte. Am Ende der Umlenkung ( $\varphi_{II} = 170^\circ$ ) ist der Trennfaktor bei der konvergenten Düse für Abschälverhältnisse  $\mathcal{J}_{SII} \geq 0.2$  höher als bei der kanalförmigen Düse, wie aus Abb. 14 hervorgeht, in der der Trennfaktor  $A_{II}$  über dem  $SF_6$ -Abschälverhältnis  $\mathcal{J}_{SII}$  aufgetragen ist.

Aus dem Verlauf des statischen Drucks am Strahlinnenrand geht hervor, daß die Absaugbedingungen bei der konvergenten Düse günstiger sind. Der statische Druck liegt etwas unterhalb des Absaugdrucks  $p_1$ , d.h., es kommt zu einer geringen Überexpansion, während bei der kanalförmigen Düse  $p_1$  nicht ganz erreicht wird (vgl. Anm. 17). Der radiale Druckunterschied in der Strömung ist bei der konvergenten Düse trotz des niedrigeren Geschwindigkeitsverhältnisses merklich größer als bei der kanalförmigen Düse, was auf die größere Strahlbreite bei der konvergenten Düse zurückzuführen ist.

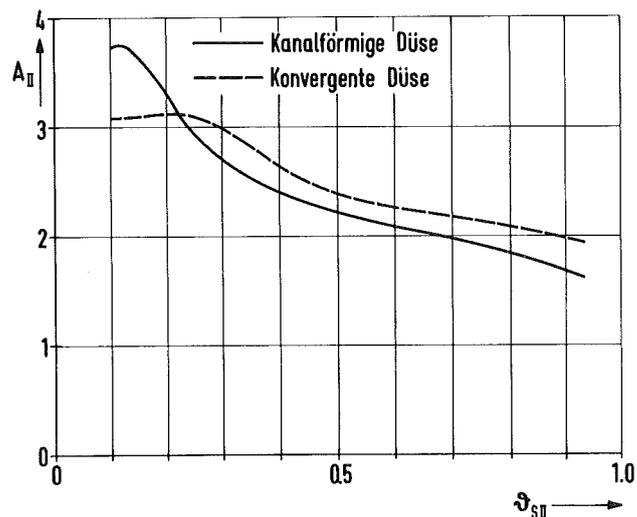


Abb. 14: Die Abhängigkeit des Gemischtrennfaktors  $A_{II}$  vom  $SF_6$ -Abschälverhältnis  $\mathcal{J}_{SII}$  beim Umlenkwinkel  $\varphi_{II} = 170^\circ$  bei einer kanalförmigen und einer konvergenten zweiten Düse. Versuchsbedingungen wie in Abb. 13.

#### 4. Diskussion der Ergebnisse

Aus den Sondenmessungen am Doppelumlenksystem geht hervor, daß es für die Nachtrennung der schweren Fraktion günstig ist, wenn das Doppelumlenksystem bei hohem Einlaßdruck und bei kleinem Abschälverhältnis der ersten Düse betrieben wird<sup>18)</sup>. Durch beide Maßnahmen wird der Gasdurchsatz durch die nachgeschaltete Düse gesteigert, d.h. die Reynolds-Zahl der Strömung in der nachgeschalteten Düse wird vergrößert. Aufgrund der höheren Reynolds-Zahl wirken sich die bei der Gasumlenkung auftretenden Reibungsverluste weniger stark aus und es werden höhere Geschwindigkeitsverhältnisse erreicht.

Bei einer Erhöhung des Einlaßdruckes werden außerdem die Reibungsverluste in der ersten Düse reduziert, und die für die Nachtrennung nutzbare kinetische Energie, d.h. das Verhältnis des Gesamtdruckes der schweren Fraktion zum Absaugdruck, wird größer. Die für die Trennung positive Wirkung höherer Geschwindigkeitsverhältnisse bei kleineren Abschälverhältnissen bzw. bei größeren Einlaßdrücken wird allerdings dadurch abgeschwächt, daß infolge des höheren Gasdurchsatzes die durch die erste Düse aufgeprägte gegenseitige Entmischung erst bei größeren Umlenk winkeln der zweiten Düse aufgehoben wird.

Bei dem hier untersuchten Doppelumlenksystem ergab sich bei einer konvergenten zweiten Düse nur eine geringfügige Verbesserung der Gemischtrennung gegenüber einer kanalförmigen Düse. Es zeigte sich jedoch, daß bei der konvergenten Düse wesentlich günstigere Absaugbedingungen vorliegen und

---

18) Die aus den Sondenmessungen ableitbaren Aussagen gelten strenggenommen nur für die Trennung von He und SF<sub>6</sub>; vgl. auch Anm. 8).

sogar eine geringe Überexpansion am Strahlinnenrand erreicht wird. Außerdem ist die Rückwirkung auf die Strömung in der vorgeschalteten Düse geringer. Diese Vorteile dürften dann an Bedeutung gewinnen, wenn man zur Verringerung der Reibungsverluste den Umlenkradius der zweiten Düse gegenüber dem der ersten Düse weiter verkleinert.

Herrn Prof. Dr. E.W. Becker danken wir für die Anregung zu dieser Arbeit und für wertvolle Diskussionen.