

Wirbelzähigkeiten und Mischungsweglängen in einem kurzen schaufellosen Radialdiffusor

M. Hoffmeister

0. Einleitung

Die Strömung in Diffusoren realer Turbomaschinen hat i.a. einen sehr komplizierten Charakter; sie ist turbulent, im statistischen Mittel dreidimensional sowie instationär, sie hängt von relativ allgemeinen Anfangs- und Randbedingungen ab und schließt häufig auch Kompressibilitätseffekte ein. Da Wirkungsgrad und Betriebsverhalten der Turbomaschinen bekannterweise stark von den Eigenschaften der Diffusoren geprägt werden, zeigt sich eine intensive Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet. Diese ist gekennzeichnet durch eine enge Verbindung zwischen experimentellen Untersuchungen und theoretischen Analysen.

Unter vereinfachten Bedingungen sind am Institut für Mechanik der AdW der DDR Messungen in einer turbulenten Radialdiffusorströmung mit starker Umfangskomponente ausgeführt worden.¹⁾ Die ermittelten Verteilungen des mittleren Geschwindigkeitsvektors und der Reynoldsschen Spannungen werden im folgenden hinsichtlich der Wirbelzähigkeiten und der Mischungsweglängen ausgewertet. Hieraus ergeben sich Hinweise für die Anwendbarkeit derartiger Ansätze unter im Vergleich zur Turbomaschine zwar vereinfachten aber noch recht allgemeinen Bedingungen.

1. Versuchsbedingungen und Messtechnik

Eine schematische Darstellung des untersuchten Modells zeigt Bild 1: Luft im Bereich normaler Zustandswerte kommt mit mäßigen Geschwindigkeiten aus einer Beruhigungsstrecke, strömt durch eine Düse und wird in die radiale Richtung umgelenkt.

Ein ruhendes Radialgitter prägt der Strömung eine starke Umfangskomponente auf. Danach tritt das Medium an r_E in den $2h$ breiten parallelwandigen, schaufellosen, hydraulisch glatten Radialdiffusor. Die unsymmetrische Lage des Drallerzeugers bewirkt eine Unsymmetrie der Strömung bezüglich der Ebene $z = 0$.

In realen Maschinen können sich derartige Zuströmverhältnisse sowohl durch ähnliche geometrische Bedingungen als auch bei Teillastzuständen ergeben.

Die Reynoldszahl der Strömung, bezogen auf r_E und die über den Querschnitt an r_E gemittelte Radialgeschwindigkeit \bar{c}_{rE} beträgt $\approx 9 \cdot 10^4$. Die örtlichen Machzahlen sind hinreichend klein, so daß für die folgenden Betrachtungen ein isothermes, inkompressibles Medium angenommen werden kann.

Das Radienverhältnis des Diffusors beträgt $r_A/r_E = 1,2$ und das Verhältnis Breite zu Eintrittsradius $2h/r_E =$

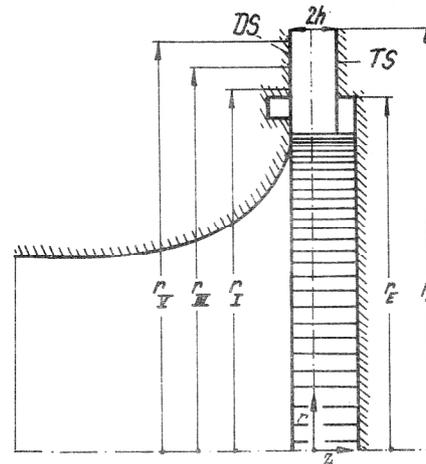


Bild 1
Schematische Darstellung der Strömungsführung zum Radialdiffusor

0,135. Die Strömung verläuft stationär, d. h. es existieren über hinreichend große Zeitintervalle gemittelte Parameter der Turbulenz $(\bar{\quad})$, die selbst von der Zeit unabhängig sind. Die Änderungen dieser Mittelwerte in der Umfangsrichtung φ werden im Vergleich zu den axialen und radialen Änderungen vernachlässigt,

$$\frac{\partial(\bar{\quad})}{r \partial \varphi} \ll \frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial z}; \frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial r},$$

obwohl gewisse, vor allem fertigungs- und montagebedingte Störungen der Rotationssymmetrie vorliegen. Mit Ausnahme von Zonen in der Diffusorströmung mit $\frac{\partial(\bar{\quad})}{\partial z} \approx 0$ zeigen Abschätzungen, daß die vorstehende

Annahme berechtigt ist.

Die Experimente werden mit Hilfe der Hitzdrahtmeßtechnik in Konstanttemperatur-Schaltung nach dem Prinzip der sukzessiv gedrehten Eindrahtsonde ausgeführt [1], [2]. Über die Tragscheibenseite (TS) mit dem Schaft parallel zur z -Achse werden die Meßfühler in das Strömungsfeld eingebracht. Im Kanalinneren, bis zu Wandabständen von ≈ 1 [mm] kommen 45° -Schrägdrahtsonden, ähnlich dem Typ DISA 55 A 29, zur Anwendung.

Die verwendete Technik ermöglicht es, die drei Komponenten des mittleren Geschwindigkeitsvektors und die sechs Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors an den gewählten Raumpunkten zu bestimmen.

1) An der Durchführung und Auswertung der Messungen waren Herr Dipl.-Ing. E. Helmstädter und Frau Ing. G. Graichen maßgeblich beteiligt. Ihnen sei auch an dieser Stelle gedankt.

Für Wandabstände kleiner als ≈ 1 [mm] kommen Normalsonden, ähnlich dem Typ DISA 55 A 25, zum Einsatz. Die Empfindlichkeitseigenschaften dieses Sondentyps erlauben eine zuverlässige Bestimmung mittlerer Geschwindigkeiten- und von Geschwindigkeitsfluktuationen nur noch in Ebenen parallel zur Wand.

2. Die Ausgangsdaten

Hitzdrahtmessungen wurden an den Radien $r_I = 1,025 r_E$, $r_{III} = 1,100 r_E$ und $r_V = 1,173 r_E$ ausgeführt (Bild 1). Die für die folgenden Auswertungen wesentlichsten Größen sind in d. Bildern 2 a, b, c dargestellt. Hierbei handelt es sich um die Radial- und Umfangskomponente des mittleren Geschwindigkeitsvektors \bar{c}_r ; \bar{c}_φ sowie um die beiden im Sinne von Grenzschichtvereinfachungen relevanten Scherspannungen des Reynoldsschen Spannungstensors $\overline{c_r' c_z'}$; $\overline{c_\varphi' c_z'}$. Als Bezugsgröße für alle Geschwindigkeiten dient hier und in der weiteren Arbeit \bar{c}_{rE} . Die axiale Koordinate z ist mit der Kanalbreite $b = 2h$ dimensionslos gemacht.

Zur Beurteilung der Meßunsicherheiten können die aus den überbestimmten linearen Gleichungssystemen des Meß- und Auswerteverfahrens folgenden Streuungen herangezogen werden. Danach betragen die Fehler der mittleren Geschwindigkeiten \bar{c}_r ; \bar{c}_φ bis zu $\pm 0,025$ und die der Reynoldsschen Spannungen $\overline{c_r' c_z'}$; $\overline{c_\varphi' c_z'}$ bis zu $\pm 0,006$.

Insbesondere für die Bestimmung der benötigten ersten partiellen Ableitungen von \bar{c}_r ; \bar{c}_φ , aber auch zur Reduzierung der Streuungen von $\overline{c_r' c_z'}$; $\overline{c_\varphi' c_z'}$ erfolgt eine Glättung der Meßwerte mit Hilfe von Ausgleichspolynomen 3. Ordnung. Jeweils 7 der dem betrachteten Aufpunkt am nächsten gelegene Meßpunkte gehen in die Ausgleichsrechnung ein. Die auf diese Weise bei einmaliger Glättung ermittelten Ausgleichskurven sind in den Bildern 2 a, b, c dargestellt, wobei für $\bar{c}_r(r; z)$; $\bar{c}_\varphi(r; z)$ zusätzlich die festen Randbedingungen $\bar{c}_r(r; \pm 0,5) = 0$; $\bar{c}_\varphi(r; \pm 0,5) = 0$ berücksichtigt wurden. Diese Ausgleichspolynome liefern an den betrachteten Aufpunkten durch Differentiation auch die benötigten ersten partiellen Ableitungen nach z .

3. Die Bestimmung der Wirbelzähigkeiten für den Impulstransport und der Mischungsweglängen.

Entsprechend dem Boussinesq Ansatz hat man für die beiden als relevant angesehenen turbulenten Scherspannungen

$$\left. \begin{aligned} -\overline{c_r' c_z'} &= \nu_{Trz} \left(\frac{\partial \bar{c}_r}{\partial z} + \frac{\partial \bar{c}_z'}{\partial r} \right), \\ -\overline{c_\varphi' c_z'} &= \nu_{T\varphi z} \left(\frac{\partial \bar{c}_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial \bar{c}_z'}{\partial \varphi} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

mit den Wirbelzähigkeiten ν_{Trz} ; $\nu_{T\varphi z}$ für den Impulstransport, die durch (3.1) definiert sind und die als Komponenten eines Tensors 2. Stufe aufzufassen sind. Im Rahmen der üblichen Grenzschichtvereinfachungen werden die 2. Terme in den Klammern von (3.1) gegen-

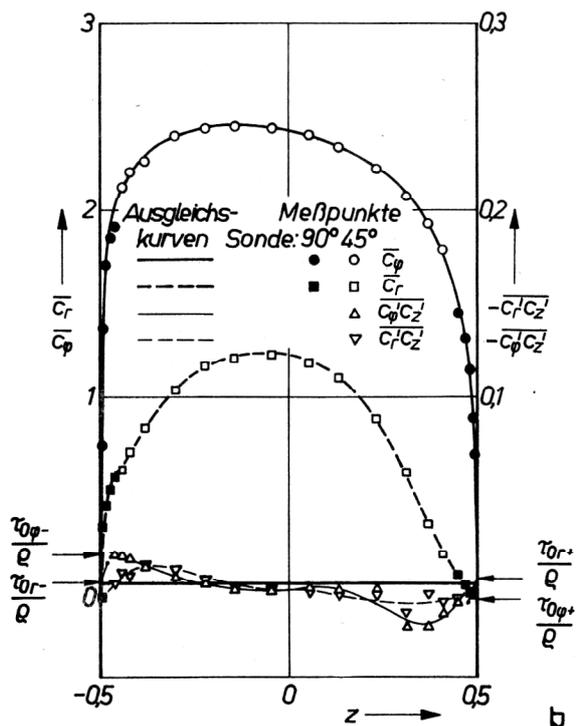
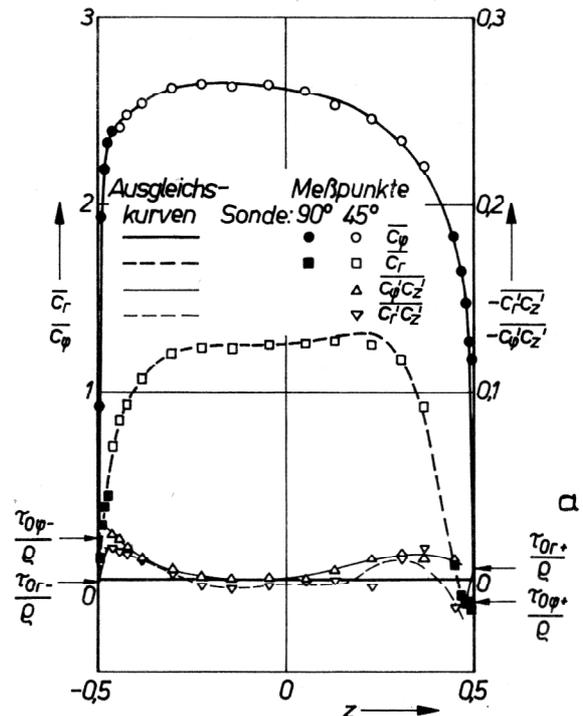
über den ersten hier und im folgenden vernachlässigt.

Das Verhältnis

$$T_{Tr\varphi} = \frac{\nu_{Trz}}{\nu_{T\varphi z}} \quad (3.2)$$

gibt Aufschluß über den Grad der Richtungsabhängigkeit der Wirbelzähigkeiten.

Unter analogen Voraussetzungen lassen sich Wirbelzähigkeiten für den Rotationstransport einführen und mit Hilfe der Messungen nach Bild 2 a, b, c berechnen. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den aus (3.1) folgenden Aussagen und sollen in dieser Arbeit nicht weiter dargestellt werden.



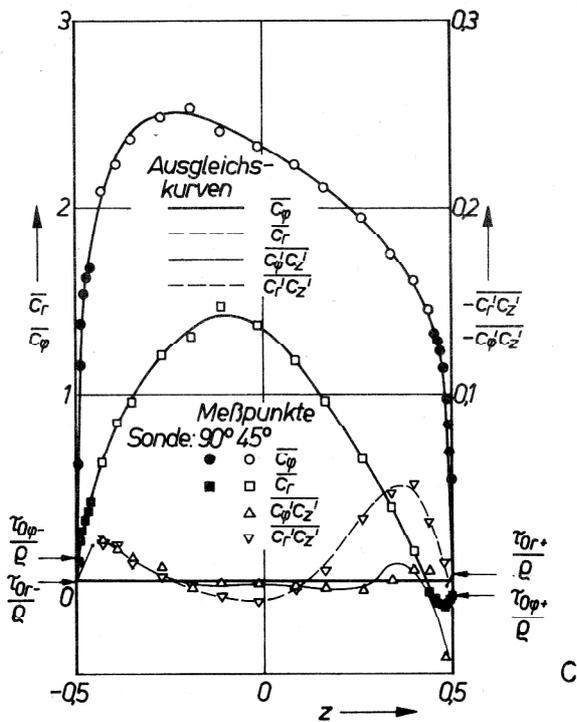


Bild 2
Die relevanten mittleren Geschwindigkeitsverteilungen und turbulenten Scherspannungen

- a: an r_I
- b: an r_{III}
- c: an r_V

Zur Prüfung der Richtungsabhängigkeit von Mischungsweglängen in der untersuchten Strömung dienten entsprechend [3] die Beziehungen

$$l_r = \left\{ \frac{-\overline{c_r' c_z'}}{\frac{\partial \overline{c_r}}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial \overline{c_r}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{c_\phi}}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}^{1/2} \quad (3.3a)$$

für die radiale Richtung,

$$l_\phi = \left\{ \frac{-\overline{c_\phi' c_z'}}{\frac{\partial \overline{c_\phi}}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial \overline{c_r}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{c_\phi}}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}} \right\}^{1/2} \quad (3.3b)$$

für die Umfangsrichtung und (vgl. [4])

$$l_{mix} = \left\{ \frac{[(-\overline{c_r' c_z'})^2 + (-\overline{c_\phi' c_z'})^2]^{1/2}}{\left(\frac{\partial \overline{c_r}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{c_\phi}}{\partial z} \right)^2} \right\}^{1/2} \quad (3.3)$$

4. Ergebnisse

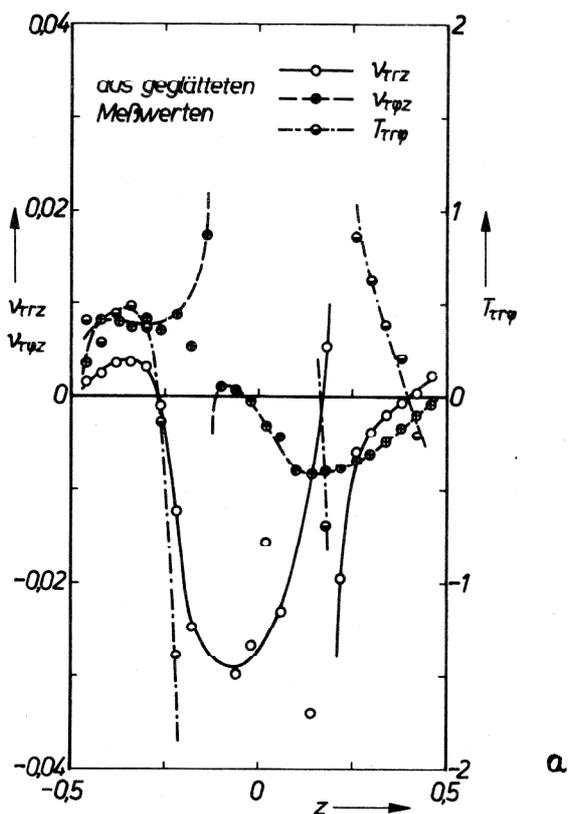
Als Folge der geometrischen Bedingungen in der Zuströmung weisen die $\overline{c_r}$ - und $\overline{c_\phi}$ -Verteilungen in den Bildern 2 a, b, c deutliche Unsymmetrien bezüglich der Ebene $z = 0$ auf.

Insbesondere kommt es für alle drei Radien auf der Tragscheibenseite zu einer ausgeprägten Vorzeichenumkehr der Radialkomponenten der mittleren Ge-

schwindigkeitsvektoren. Die mittleren meridionalen Stromlinien in der r, z -Ebene des Diffusors zeigen deshalb für $0,45 \lesssim z \lesssim 0,5$ ein Rückströmgebiet, das am ausgeprägtesten an r_V in Erscheinung tritt. Wegen der auch in diesem Bereich noch starken mittleren Umfangskomponente der Strömung bleiben die resultierenden Wandschubspannungen jedoch von null verschieden. Das tragscheibenseitige meridionale Rückströmgebiet erstreckt sich vermutlich über die volle radiale Breite des Diffusors, so daß kein „Ablöseradius“ existiert.

Mit Ausnahme eines Meßpunktes an r_{III} gibt es für die Deckscheibenseite keinen Hinweis auf eine Vorzeichenumkehr in $\overline{c_r}$. Tendenziell spitzen sich die mittleren Geschwindigkeitsprofile mit wachsendem r zu und verschieben sich in Richtung Deckscheibe. Diese Aussage – wie alle sich auf die radiale Entwicklung der Strömung beziehenden Aussagen – beruht allerdings auf der Voraussetzung einer exakten Rotationssymmetrie und ist deshalb mit einem Vorbehalt zu versehen; denn einerseits befinden sich die Meßstellen nicht auf einem Radiusvektor, und andererseits liegt eine kräftige Drallströmung vor.

Der unterschiedliche Charakter der wandnahen Strömungen auf Deck- und Tragscheibe spiegelt sich auch in den Scherspannungsverteilungen wider. Die bei vergleichbaren Strömungsbedingungen bei positiven und negativen z -Werten zu erwartende Asymmetrie der $\overline{c_r' c_z'}$; $\overline{c_\phi' c_z'}$ -Verläufe bezüglich $z = 0$ weist an r_I ; r_V starke und an r_{III} noch deutliche Störungen auf. Insbesondere in der Kanalmitte des Diffusors und im Bereich der Tragscheibe werden die Gradientenansätze nach (3.1) in gewissen Intervallen versagen, weil die Nulldurchgänge und Vorzeichen der links stehenden Turbulenzparameter nicht mit denen der rechts stehenden partiellen Ableitungen der mittleren Geschwindigkeitskomponenten korrespon-



a

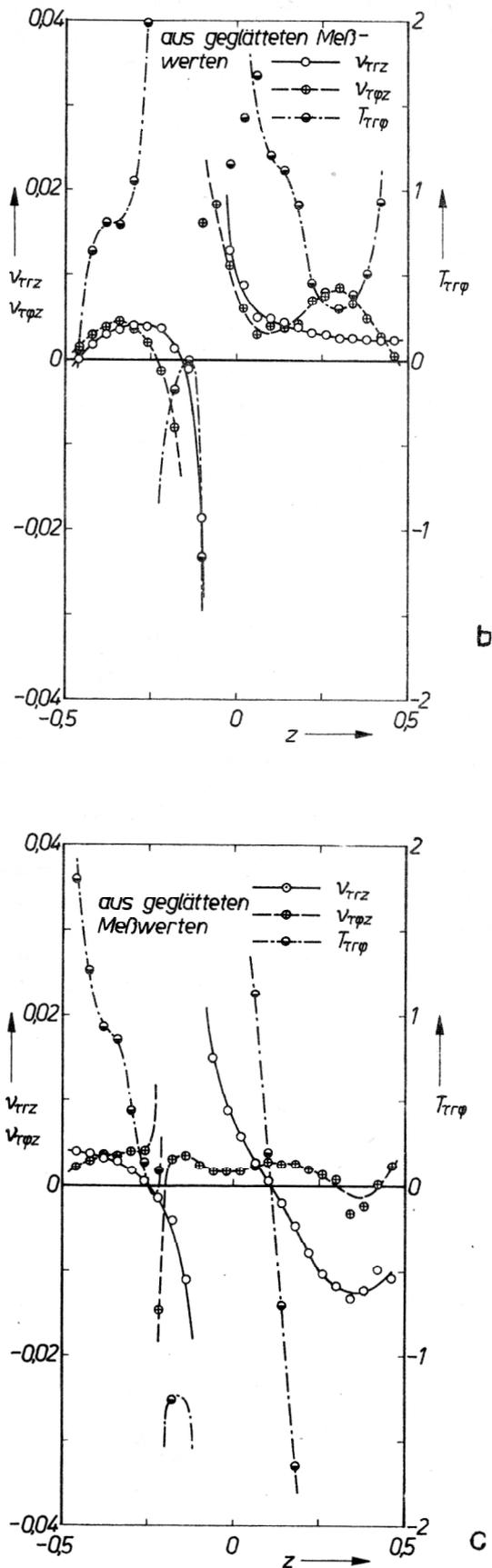


Bild 3
Wirbelzähigkeiten für den Impulstransport und ihr Verhältnis
a : an r_I
b : an r_{III}
c : an r_γ

dieren. Die Breite des Gebietes, das Abweichungen von der Asymmetrie aufweist, ist wesentlich größer als die des meridionalen Rückströmgebiets.

Die Wirbelzähigkeiten für den Impulstransport ν_{Trz} ; ν_{Trpz} nach (3.1) sind zusammen mit ihrem Verhältnis (3.2) in den Bildern 3 a, b, c dargestellt. Es zeigt sich, daß von einer skalaren Wirbelzähigkeit ($T_{Trp} \approx 1$) lediglich in gewisser Näherung für den Bereich der Deckscheibe in den Bildern 3 b, c sowie in Bild 3 b für $z \approx 0 \dots 0,1$ gesprochen werden kann. Berechnungsmodelle mit einer richtungsunabhängigen Wirbelzähigkeit entsprechen deshalb nur bedingt den tatsächlichen Gegebenheiten.

Die Kurven für die Wirbelzähigkeiten sollen nicht im einzelnen diskutiert werden, zumal die Lagen der Pole und Nulldurchgänge im Rahmen der oben erwähnten Unsicherheitsspannen zu sehen sind. Wesentlich ist aber, daß im Bereich der Deckscheibe aller drei Meßquerschnitte und zusätzlich im Bereich der Tragscheibe an r_{III} das physikalisch mit den Ansätzen (3.1) erwartete Verhalten, nämlich positive Werte, auftritt. Insbesondere für positive z -Werte an r_I und r_γ – hier für ν_{Trz} allein – wird das Strömungsverhalten nicht durch Gradientenansätze der Art (3.1) beschrieben. Dieser Sachverhalt hängt vermutlich mit den stärker ausgeprägten Rückströmungserscheinungen in diesen Bereichen zusammen. Zur genaueren Analyse sind weitere Untersuchungen erforderlich, auch über die entstehenden Fehler durch Vernachlässigung dieses Effektes bei Modellierungen.

Läßt man einmal die Nulldurchgänge und Pole in dem ν_{Trz} - und ν_{Trpz} -Verlauf im mittleren Kanal unberücksichtigt, so kann man mittlere, konstante Näherungswerte für gewisse z -Intervalle angeben, vgl. Tabelle 1.

Mit allem Vorbehalt, der bei dieser Näherungsbetrachtung erforderlich ist, vor allem wegen der begrenzten Intervalle, zeigt sich eine gewisse Unabhängigkeit für ν_{Trz} von r und eine fallende Tendenz mit r bei ν_{Trpz} . Hieraus folgt im Mittel eine Zunahme von T_{Trp} mit r . Die Auswertung der Beziehungen (3.3) für die Mischungsweglängen enthält Bild 4. Als Normierungsgröße dient die Kanalbreite $2h$.

Mit Ausnahme der Tragscheibenseite an r_I zeigen alle Mischungswegverteilungen bei Annäherung an die Wand eine Tendenz zu den Geraden $0,4 (z + 0,5)$ bzw. $-0,4 (z - 0,5)$ in Übereinstimmung mit dem für ebene Grenzschichten bekannten Verhalten. Dabei ist zu beachten, daß für einige Abschnitte im Diffusor die Relationen (3.3 a), (3.3 b) keine reellen Werte liefern.

Eine Richtungsabhängigkeit der Mischungsweglängen tritt besonders deutlich an der Deckscheibe für r_I , aber auch im Bereich der Tragscheibe an r_{III} auf. Erkennbar ist ferner eine Tendenz zu kleineren Mischungsweglängen mit zunehmendem Radius, besonders an der Deckscheibenseite. Würde man im Kernbereich ohne Berücksichtigung der Pole und Nulldurchgänge Mittelwerte bilden, so würden diese mit r ebenfalls eine fallende Tendenz aufweisen, vgl. vor allem l_φ . Dieser Sachverhalt steht im Einklang mit den früher erwähnten abnehmenden Wirbelviskositäten für die Umfangsrichtung. Auch die auf die Grenzschichtdicke bezogenen l_{mix} -Werte nach Elsenaar/Boelsma in [4] weisen im Außenbereich mit wachsender Lauflänge eine Abnahme aus.

Tabelle 1
Mittlere Wirbelzähigkeiten für den Impulstransport (bezogen auf $2h_{crE}$)

	ν_{Tz}	z-Intervall	$\nu_{T\varphi z}$	z-Intervall	$T_{T\varphi}$
r_I	$\approx 0,004$	$-0,4 \lesssim z \lesssim -0,3$	$\approx 0,008$	$-0,4 \lesssim z \lesssim -0,2$	$\approx 0,5$
r_{III}	$\approx 0,004$	$-0,4 \lesssim z \lesssim -0,2$ $0,1 \lesssim z \lesssim 0,4$	$\approx 0,004$	$-0,4 \lesssim z \lesssim -0,3$ $+ 0,05 \lesssim z \lesssim 0,2$	≈ 1
r_V	$\approx 0,004$	$-0,45 \lesssim z \lesssim -0,25$	$\approx 0,003$	$-0,45 \lesssim z \lesssim -0,25$ $-0,15 \lesssim z \lesssim +0,2$	$\approx 1,3$

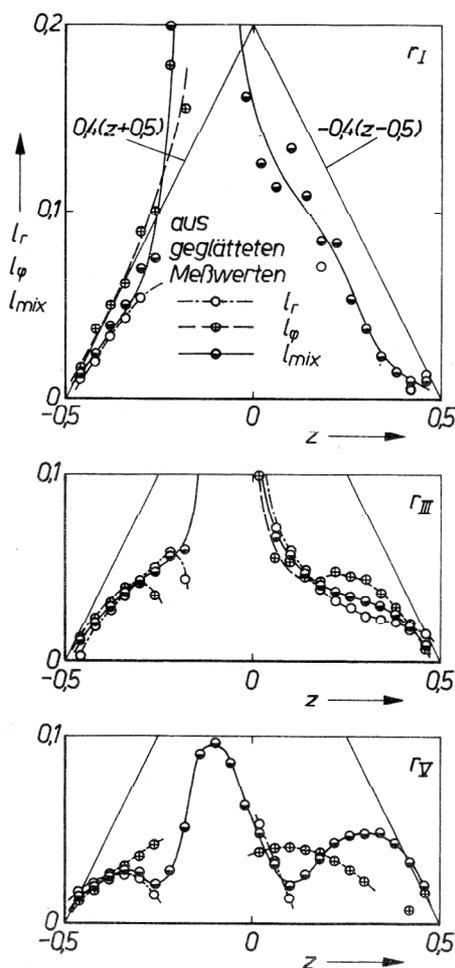


Bild 4
Mischungsweglängenverteilungen

Analoges wurde für die Mischungsweglängen in der Stromlinienrichtung bei Beziehen auf die Grenzschichtdicke festgestellt [3].

5. Zusammenfassung

Die turbulente Strömung im untersuchten Radialdiffusor entwickelt sich sowohl im Kernbereich als auch in Wandnähe stark unsymmetrisch. Im Bereich der Tragscheibe kommt es zu einer mittleren meridionalen Rückströmung in unmittelbarer Wandnähe, die besonders kräftig in der Zu- und Abströmzone des Diffusors ausfällt. Diese Gebiete sind es vor allem auch, die eine komplizierte Struktur aufweisen und nicht durch Gradientenansätze für die turbulenten Scherspannungen beschrieben werden können. In Zonen mit wohldefinierten Wirbelzähigkeiten für den Impulstransport tritt eine Richtungsabhängigkeit auf, die sich in Unterschieden der Wirbelzähigkeiten in peripherer und radialer Richtung zeigt. Eine überschlägige quantitative Auswertung ergibt im Mittel für die Gebiete im Diffusor, die eine zuverlässige Bestimmung der Wirbelzähigkeiten ermöglichen, eine Abnahme der Wirbelzähigkeiten für die Umfangsrichtung mit wachsendem Radius und eine ungefähre Konstanz für diejenigen der radialen Richtung.

Die richtungsabhängigen Mischungsweglängen sind im Bereich der Zu- und Abströmung auf der Tragscheibenseite nicht definiert, und die „gemischten“ Mischungsweglängen zeigen darüber hinaus in der Zuströmung der Tragscheibenseite ein von der üblichen Wandabstandsproportionalität abweichendes Verhalten. Dieses ist sonst zumindest mit zunehmender Annäherung an die Wände zu beobachten. In einigen Bereichen tritt ein anisotroper Charakter der Mischungsweglängen in Erscheinung. Im Mittel weisen diese ferner eine fallende Tendenz mit wachsenden Radien auf.

LITERATUR

- [1] M. Hoffmeister: Zur Anwendung einer einfachen Hitzdrahtsonde auf dreidimensionale turbulente Strömungsfelder. *Maschinenbautechnik* 19 (1970) 8, S. 399 bis 408.
- [2] M. Hoffmeister: Nichtlineares Auswertungsverfahren für Turbulenzmessungen mit einfachen Hitzdrahtsonden. *Maschinenbautechnik* 23 (1974) 12, S. 545 bis 549.
- [3] U. Müller: Messung von Reynoldsschen Spannungen und zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten in einer dreidimensionalen Grenzschicht mit nichtverschwindenden Druckgradienten. Dissertation TH Aachen 1979. Vgl. auch Abh. aus dem Aerodynamischen Institut der Rhein. Westf. TH Aachen, H. 24, S. 36 bis 43 (1980).
- [4] J.P. Johnston: Experimental Studies in Three-dimensional Turbulent Boundary Layers. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Report MD-34, Juli 1976.

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr. M. Hoffmeister
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
1199 Berlin
Rudower Chaussee 5