

Diss. ETH 5646

**Das turbulente Strömungsfeld in einem langen
Kreiskegel-Diffusor**

ABHANDLUNG

zur Erlangung
des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

RAFFAELLO POZZORINI
dipl. Masch. Ing. ETH
geboren am 5. März 1941
von Brissago (Kt. Tessin)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Thomann, Referent
Prof. Dr. W. Traupel, Korreferent

Eduard Truninger AG Zürich
1976

VI ZUSAMMENFASSUNG

Durch systematische und möglichst genaue Ausmessung des Strömungsfeldes in einem geraden 6^0 -Kreiskegeldiffusor wurde versucht:

- umfassende Informationen über die lokalen Strömungseigenschaften (insbesondere die Turbulenz) in langen Diffusoren zu gewinnen,
- zuverlässige und konsistente Messresultate im Fall der verzögerten turbulenten (internen) Scherströmung als Vergleichsbasis für theoretische Strömungsmodelle zu beschaffen,
- konkrete Anhaltspunkte über die Zuverlässigkeit bisheriger Messmethoden im Fall einer komplizierten (hochturbulenten) Strömung zu erhalten.

Die aus der Untersuchung von vier Hauptvarianten der Diffusorströmung mit stark unterschiedlichen Eintrittsbedingungen gewonnenen Resultate vermitteln eine gute Uebersicht der vielfältigen Strömungsverhältnisse, die in einem relativ langen Diffusor vorliegen können. Betrachtet wurden:

- drei (theoriefreundliche) Messanordnungen mit turbulenzarmer Kernströmung und jeweils dünner, mitteldicker oder sehr dicker turbulenter Eintrittsgrenzschicht,
- eine Messanordnung mit stark turbulenter Kernströmung am Diffusoreintritt. Bei den Anordnungen ①, ②, ③ wurde zudem die Reynoldszahl, bei Anordnung ④ der Turbulenzgrad der Kernströmung variiert.

Die experimentelle Arbeit wickelte sich in drei Phasen ab:

1. Phase : Untersuchung und Verbesserung der Strömungseigenschaften in der Messstrecke des verwendeten Grenzschichtkanals (Diffusor-Eintrittsbedingungen).
Erforschung der transversalen Struktur turbulenter Grenzschichten.
Messung der Grenzschicht-Entwicklung entlang des Vorschaltrohres und im Mischrohr nach einer plötzlichen Rohrerweiterung.
2. Phase : Verfeinerung einiger Messprozeduren und Analyse möglicher Messfehler.
Herleitung der Beziehungen für die Turbulenzkorrektur von Hitzdraht- und Drucksonden und Untersuchung von Interferenzeffekten.

Erprobung der Korrekturformeln und Abschätzung der erzielbaren Messgenauigkeit durch Vergleich der Resultate verschiedener Messmethoden.

3. Phase : Durchführung der systematischen Messungen für die gewählten Versuchsvarianten und Korrektur der Messergebnisse.

Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Resultate in dimensionsloser Form und preliminäre Diskussion.

Eine pauschale Analyse des Messmaterials (Kontrolle der Massen- und Impulsstrombilanzen) wurde anschliessend unternommen, um die Verwendbarkeit der Messresultate für theoretische Zwecke zu prüfen.

Ein Teil der Resultate diene zuletzt zur Diskussion von zwei sowohl messtechnisch wie theoretisch umstrittenen Problemen: die genaue Bestimmung der Wandschubspannung und die Brauchbarkeit des Wandgesetzmodelles im Fall der verzögerten turbulenten Grenzschichtströmung.

VI.1 Eigenschaften der Strömung im Grenzschichtkanal

Die praktische Realisierung theoriefreundlicher Strömungsbedingungen am Eintritt des Diffusors hat grosse Anstrengungen verlangt. Dies bestätigte die ausserordentliche Schwierigkeit in der experimentellen Kontrolle der Grenzschichteigenschaften (Symmetrie, Grenzschichtstruktur, Reproduzierbarkeit) in der Messstrecke von Grenzschichtkanälen.

Die Ursache der meisten Störungen, welche interessanterweise nur innerhalb der Grenzschicht zum Vorschein kamen, wurde bei den Kanaleinlauf-Elementen (Luftfilter, Turbulenzsieben, Kanalkontraktion) gefunden. Die Wahl des Saugbetriebes, die richtige Auslegung dieser Elemente und die zweckmässige Positionierung der künstlichen Umschlagsstelle führten schliesslich zu einer akzeptablen Lösung des Problems. Resultate aus der Untersuchung von drei Varianten der Kanaleinlauf-Geometrie lassen einige der weniger offensichtlichen Grenzschichtstörungen gut erkennen.

Makroskopische Unsymmetrien der (turbulenten) Grenzschicht sind mit solchen der Kanaleinlauf-Geometrie eng verbunden und können sehr lokaler Natur sein (Grenzschicht-Streifungen). Schon bei leichter räumlicher Pendelung der Grundströmung geben sie Anlass zu "Pseudo-Turbulenz", vergleiche

Einlaufvariante 1 .

Die Missachtung des Stabilitätskriteriums für Turbulenzsieve resultiert ebenfalls in unregelmässigen Modulationen der Grenzschichtströmung. Der positive Druckgradient eines nachgeschalteten Diffusors spielt dabei eine anfachende Rolle und kann somit als guter Störungsdetektor ausgenützt werden, vergleiche Einlaufvariante 2 .

Eine nichttriviale und oft unbemerkte (Störungs)-Erscheinung der Grenzschichtströmung, die im vorliegenden Grenzschichtkanal gut zu beobachten war, ist die longitudinale Wirbelstruktur der turbulenten Grenzschicht (auch transversale Grenzschicht-Struktur genannt). Dieses vermutlich universelle Strömungs-Phänomen äussert sich in einer feineren transversalen Modulation der Grenzschichtdicke und der Wandschubspannung, vergleiche Einlaufvariante 3 .

Verschiedene Aspekte ihrer Entstehung, Entwicklung und Auflösung wurden näher untersucht und die gewonnenen Resultate erlaubten eine bessere Identifizierung der wesentlichen Einflussfaktoren. Die transversale Struktur scheint durch einen Verstärker-Mechanismus während des laminar-turbulenten Umschlages auf die Grenzschicht aufgeprägt zu werden und klingt stromabwärts praktisch nicht ab. Interessanterweise vermag die transversale Grenzschicht-Struktur am grundsätzlichen Charakter des turbulenten Grenzschichtprofils praktisch nichts zu ändern, wie die vielen Messungen im Vorschaltrohr gezeigt haben (vergleiche Clauser-Diagramme). Ein starker Druckanstieg (Diffusor) bewirkt die Auflösung der Struktur und aus dem Zerfall der grössten Struktur-Elemente ergeben sich unregelmässige, makroskopische Strömungssymmetrien, wie sie in turbulenten Ablösezone schon oft festgestellt worden sind. Ein wesentliches Resultat der unternommenen Abklärungsversuche ist der Nachweis einer sehr engen Verknüpfung zwischen Struktur der Grenzschichtströmung und Eigenschaften der Aussenströmung, welche durch die Ergebnisse von Messanordnung ④ in eindrücklicher Weise gezeigt werden konnte. Im Fall der hochturbulenten Kernströmung war z.B. keine Längswirbelstruktur feststellbar.

Die transversale Struktur turbulenter Grenzschichten ist schon vom experimentellen Standpunkt aus von Bedeutung. Sie kann unter anderem die Streuung lokaler Grenzschichtmessungen (typisches Beispiel die Wandschubspannung) sowie die schwierige Reproduzierbarkeit der lokalen Strömungsverhält-

nisse in vielen Grenzschicht-Experimenten erklären. Es wurde dabei festgestellt, dass solche Schwierigkeiten durch eine gute Kontrolle der Struktur der Aussenströmung praktisch eliminiert werden können.

Die geforderten aerodynamisch sauberen und reproduzierbaren Grenzschichtverhältnisse am Diffusoreintritt liessen sich mit der dritten Einlaufvariante des Grenzschichtkanals weitgehend erfüllen.

VI.2 Messtechnische Aspekte

Das untersuchte Strömungsfeld zeichnete sich durch eine ausgeprägte Inhomogenität der Grundströmung bei intensiver, anisotroper Turbulenz aus. Nur ein Teil der begegneten Mess-Schwierigkeiten konnte mit Hilfe der bereitstehenden Messmethoden zufriedenstellend gelöst werden.

Wesentliche Einschränkungen resultierten aus:

- Prinzip der Messmethoden (Beispiel: Gleichrichtungseffekt der thermischen Sonden),
- Fehlen von Daten über die räumliche und zeitliche Struktur der lokalen Turbulenz (Turbulenzskala und höhere Korrelationen sind für eine sinnvollere Anwendung der Turbulenzkorrekturen besser zu erforschen),
- nichtlineare Koppelung vieler Fehler-Beiträge, was die einfache Superposition unkorrekt macht (Beispiel: Betrag- und Richtungs-Schwankungen bei der Turbulenz),
- ungenügendes Auflösungsvermögen der Sonde (Beispiel: X-Sonde),
- beschränkte Bandbreite der analogen Messapparatur (Beispiel: untere Frequenzgrenze der RMS-Voltmeter).

Zur Aufrechterhaltung einer möglichst hohen Messgenauigkeit haben beigetragen:

- die sorgfältige Eichprozedur im DISA-Eichkanal (Temperaturdrift-Berücksichtigung und Luftfiltrierung),
- die weitgehende Kompensation der Nichtlinearität bei Hitzdrahtsonden (verbesserte Linearisierung der Hitzdraht-Charakteristik),
- die bestmögliche Korrektur der Messergebnisse (vor allem Turbulenz-Korrekturen),
- die dauernde Ueberwachung des Luftzustandes im Grenzschichtkanal (Luftfiltrierung und Temperaturdrift-Korrektur der Hitzdrahtanzeige).

Ein konkreter Beitrag zur Abklärung der Messgenauigkeit wurde dadurch erbracht, dass die meisten Strömungsgrößen systematisch mit verschiedenen Methoden (z.B. Pitotrohr und Hitzdraht) oder Sonden (z.B. Hitzdraht und X-Sonde) gemessen wurden.

Bedeutsame Fehlerbeträge ergaben:

- die hohe relative Turbulenzintensität (kombinierte Wirkung der komplizierten Richtungsempfindlichkeit und der mikroskopischen (sondeneigenen) Interferenz),
- makroskopische Strömungs-Interferenzen (Staueffekte oder Kanalverspernung durch die Sondenhalterung, Wandinterferenz),
- thermische Effekte bei Hitzdrahtsonden (thermische Wandinterferenz),
- Scherströmungs-Effekte bei Drucksonden (vorallem beim Pitotrohr).

Für die üblichen Korrekturen liessen sich Literatur-Daten verwenden. Druckgradient-Einflüsse auf die Scherströmungs- und Interferenz-Korrekturen gewisser Sonden (statische Sonde, Prestonrohr, X-Sonde) konnten mangels quantitativer Unterlagen nicht eingerechnet werden. Für die Turbulenz-Korrekturen mussten ergänzte Beziehungen hergeleitet werden, während makroskopische Interferenz-Effekte anhand spezieller Versuche identifiziert und bewertet werden konnten.

Drucksonden

Beim Pitotrohr überwiegen Turbulenz-Messfehler (Endzone des Diffusors) und Scherströmungs-Korrekturen (Eintrittszone des Diffusors und Vorschaltrohr). In der für die Auswertung der Staudruckmessung verwendeten Korrekturformel wurde der turbulenzbedingte Beitrag der statischen Druckvariation in Traversierichtung näherungsweise (nur v^2 - und $\sqrt{v^2}$ -Beitrag) einbezogen. Als Bezugsdruck für die Staudruckmessung diente stets der leicht messbare Wanddruck p_w .

Mangels an genaueren Angaben über die Turbulenzstruktur wurde für die Korrektur der Pitotrohrmessung die in Wandnähe annehmbare Version ($B=0$) der Hinze'schen Korrekturformel gewählt. Gegen Diffusorende ist die darin enthaltene Voraussetzung eines kleinen momentanen Anströmwinkels der Sonde (für grössere Wandabstände) offensichtlich weniger gut erfüllt, weshalb die so korrigierten lokalen Geschwindigkeiten im Vergleich zum Hitzdraht

zu niedrig ausfallen. Diese Tendenz ist umso ausgeprägter, je mehr die lokale Strömung den Grenzschicht-Charakter verliert, am grössten also im Fall der dicken Diffusor-Eintrittsgrenzschicht (Messanordnung ③).

Die beim Pitotrohr vorzunehmende Scherströmungs-Korrektur ist vermutlich durch den Druckgradient stark beeinflusst und scheint im Diffusor betragsmässig ungenügend zu sein.

Bei der statischen Drucksonde ergaben sich bedeutende Messfehler infolge der starken Turbulenz (dominant gegen Diffusorende) und wegen der Sondenhalterungs-Interferenz (gut sichtbar am Diffusoreintritt). Ihre Grössenordnung zeigen die durchgeführten Vergleiche mit der radialen Impulsbilanz und einige Interferenzversuche. Die Notwendigkeit von Turbulenz-Korrekturen wird von den Vergleichs-Ergebnissen deutlich bestätigt, obwohl auch hier die Unsicherheit der unbekanntenen lokalen Turbulenzstruktur und des spezifischen Sondenkoeffizienten A (nach Hinze) nur qualitative Urteile erlaubt.

Die Anwendbarkeit von Prestonrohren im Diffusor hängt von der Gültigkeit der universellen Wandgesetz-Hypothese ab. Obwohl die aus dem Prestonrohr gewonnenen τ_w -Werte beim ersten Anblick vernünftig erscheinen, dürfte die effektive Wandschubspannung dabei ziemlich überschätzt werden. Der starke Einfluss des positiven Druckgradienten und der Trägheitskräfte auf die wandnahe Strömungsschicht im Eintrittsteil des Diffusors spricht gegen die Gültigkeit des universellen Wandgesetzes (also auch der üblichen Prestonrohr-Eichkurve). Diese Behauptungen stehen im Einklang mit neueren Literatur-Ergebnissen.

Hitzdrahtsonden

Hitzdrahtsonden lassen sich im Vergleich zu Drucksonden mathematisch besser modellieren, sind aber auf Störeinflüsse empfindlicher.

Dank dem elektronischen Linearisator konnte eine weitgehende Ausschaltung der Nichtlinearität der Eichkurve und eine gute Anpassung der zwei Draht-Charakteristiken bei der X-Sonde erzielt werden, was das Problem der Turbulenzkorrekturen beträchtlich vereinfachte.

Bei starker Turbulenzintensität verursacht jedoch die komplizierte Rich-

tungsempfindlichkeit des Hitzdrahtes eine weitere Nichtlinearität, die nur rechnerisch korrigiert werden kann. Die etwas vereinfachende Annahme einer "zweidimensionalen" Richtungsempfindlichkeit erlaubt die Erfassung der wichtigsten Fehler mit vernünftigem Rechenaufwand. Störeffekte höherer Ordnung (wie Stau- und Dellen-Wirkung von Sondenkörper und Sondenspitzen) lassen sich wohl in Korrekturformeln einbauen, aber die bei solchen Rechnungen stets vorausgesetzte homogene Anströmung der Sonde verleiht der immer aufwendigeren Analyse einen mehr akademischen Charakter, da die meisten Messungen in Scherströmungen stattfinden.

Ohne parallele Messung der lokalen Turbulenz-Struktur (Turbulenzskala, höhere Korrelationskoeffizienten) bleiben die Ergebnisse der Turbulenz-Korrekturen unsicher. Auch die Abschätzung des qualitativen Verlaufes wird dadurch erschwert, dass die entsprechenden Korrekturterme in verschiedenen Strömungsgebieten ihre Vorzeichen wechseln können.

Für die linearisierte Eindrahtsonde (mit Hitzdraht parallel zur Wand) zeigten sich die Turbulenzkorrekturen minim (kein Scherströmungseffekt, Längskühlung unbedeutend). Es besteht hier eine leichte Tendenz zur Ueberschätzung der Strömungsgeschwindigkeit und der longitudinalen Geschwindigkeitsschwankung. Viel kritischer können (in unmittelbarer Wandnähe) die Fehler aus der thermischen Wandinterferenz und aus der nicht einfachen Wandabstand-Bestimmung sein.

Die X-Sonde weist dagegen relativ grosse Korrekturen auf. Besonders wichtig ist der Längskühlungs-Messfehler, der auch bei schwacher Turbulenzintensität für die Ueberschätzung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und für die Unterschätzung der übrigen Komponenten (longitudinale Schwankungen ausgenommen) verantwortlich ist.

Für Grenzschichtmessungen ist das räumliche Auflösungsvermögen der X-Sonde schlecht (Abstand der Drähte ≈ 1 mm). Bei Messung der turbulenten Schwankungen resultiert aus der dadurch bedingten unperfekten Korrelation beider Drahtsignale eine gewisse Verfälschung der Beträge. Bei starker Scherströmung wird die Auswertung von X-Sonden-Messungen (z.B. in der \bar{w} -Stellung) ausserordentlich kompliziert. Das Problem hat in der bisherigen Literatur keine saubere Behandlung gefunden.

Spezielle Aufmerksamkeit wurde der Möglichkeit von Interferenzmessfehlern bei der Grenzschicht-Hitzdrahtsonde geschenkt. Die ausgeprägte Abhängigkeit dieser Effekte von den jeweiligen Strömungsverhältnissen (Stärke der lokalen Scherströmung und des longitudinalen Druckgradienten) macht allgemeine Aussagen über die verursachten Fehler unmöglich. In jedem Fall scheint eine spezifische Eichung erforderlich. Kontrollmessungen wurden im gefährdeten Diffusor-Eintrittsgebiet durchgeführt: die nachgewiesenen Messfehler zeigten sich für die dortigen Betrachtungen unwesentlich, bestätigten aber die Notwendigkeit einer besseren Abklärung der Verhältnisse im Fall der X-Sonde.

Gut zu beobachten war ferner die thermische Wandinterferenz, wofür die Korrekturprozedur noch sehr umstritten ist. Da die wenigen damit behafteten Messpunkte für die Analyse der Resultate nicht unentbehrlich waren, wurde auf dieses Problem nicht speziell eingegangen.

VI.3 Eigenschaften des Strömungsfeldes in einem Diffusor

Die Auswahl der Versuchsvarianten und der Messquerschnitte, sowie die Auswertung und Darstellung der Messresultate wurden nach folgenden Kriterien vorgenommen:

- Vermittlung einer pauschalen Uebersicht der Strömungsentwicklung und der lokalen Turbulenz-Eigenschaften bei verschiedenen Diffusoreintrittsverhältnissen (Reynoldszahl, Grenzschichtdicke, Zustand der Kernströmung).
- Charakterisierung der besonderen Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Wandnähe (Wandgesetz) unter dem Einfluss einer starken Verzögerung der Grundströmung,
- Hervorhebung der grundsätzlichen Unterschiede in der Struktur der Grenzschichtströmung (transversale Grenzschichtstruktur, Struktur des Geschwindigkeitsprofils) und der Turbulenz in Fällen mit turbulenzarmer und stark turbulenter Kernströmung, sowohl beim Rohr (leichter Druckabfall) wie beim Diffusor (starker Druckanstieg),
- systematische Kontrolle der Zuverlässigkeit quantitativer Messergebnisse.

A) Fall der turbulenzarmen Kernströmung

Die untersuchten Strömungsfälle waren durch folgende Merkmale charakterisiert:

Messanordnung ①: verschwindender Strömungskern am Diffusorende (mitteldicke Eintrittsgrenzschicht).

Messanordnung ②: ungestörter Strömungskern bis zum Diffusorende (dünne turbulente Eintrittsgrenzschicht).

Messanordnung ③: abwesende Kernzone entlang eines grösseren Teils des Diffusors (sehr dicke turbulente Eintrittsgrenzschicht).

Die Reynoldszahl-Abhängigkeit wurde bei jeder Messanordnung untersucht. Der Reynoldszahl-Bereich reichte bei einer kritischen Kanal-Reynoldszahl um $\Delta p_D = 10$ mmWS bis zu $Re_D = U_D \cdot D / \nu = 5 \cdot 10^5$ (entsprechend $\Delta p_D = p_K - p_D = 100$ mmWS). Für überkritische Diffusor-Eintrittsverhältnisse (turbulente Grenzschicht) zeigte sich ein Reynoldszahl-Einfluss praktisch nur bei der Rohrströmung (Grenzschichtentwicklung, Ausdehnung der logarithmischen Profilzone im Clauser-Diagramm, Grösse der Wandschubspannung). Für unterkritische Diffusor-Eintrittsverhältnisse (laminare Grenzschicht) änderte sich der Strömungscharakter im Diffusor wegen der Bildung einer laminaren Ablöseblase und des abrupten Grenzschicht-Umschlages im Gebiet der Wandknickstelle am Diffusorbeginn lokal (siehe Messanordnung ①, Subvariante $p_K - p_D = 10$ mmWS).

Charakteristisch bei turbulenzarmer Kernströmung sind: die transversale Strukturierung der turbulenten Grenzschicht am Diffusoreintritt, deren Zerfall im Gebiet des anfänglich steilen Druckanstieges und die dadurch bedingte Entstehung von makroskopischen Strömungsunsymmetrien am Diffusorende.

Eine Grenzschicht-Ablösung im üblichen Sinn konnte in diesem Diffusor nicht festgestellt werden. Die registrierten hohen Turbulenz-Intensitäten, das Auftreten sehr niederfrequenter Pendelungen der wandnahen Strömungsgeschwindigkeit (Integrationszeiten bis zu 30 sec. notwendig) und der nahezu verschwindende Gradient des Reynolds'schen Schubspannungsprofils in Wandnähe (siehe Diffusorende bei Messanordnung ③) deuten aber auf das schrittweise Eintreten von intermittenter Rückströmung hin.

Bei der ausführlich untersuchten Versuchsanordnung ① ergaben sich folgende typische Merkmale für eine gewöhnliche Diffusorströmung:

- das Erscheinen eines Wendepunktes im Geschwindigkeitsprofil (Auftragung in physikalischen Koordinaten) in Zusammenhang mit der raschen Verdickung der Scherzone ab etwa Diffusormitte,
- die Entstehung bedeutender radialer Geschwindigkeiten mit ausgeprägten Maxima im Zentrum der Scherzone,
- die rapide Einschnürung des turbulenzarmen Kernes infolge starker radialer Ausbreitung der Scherzone,
- das Auftreten beträchtlicher Druckgradienten quer zur Strömungsrichtung in Zusammenhang mit der starken Stromlinienkrümmung (Diffusoreintritt) oder den starken radialen turbulenten Spannungen (Diffusorende),
- der rasche Uebergang der Strömung im Diffusor vom Grenzschicht- zum Freistrahls-Charakter, mit Verschiebung der Maxima der turbulenten Spannungen gegen das Zentrum der Scherzone bei abfallenden Werten gegen Diffusorachse und Diffusorwand. Interessant ist hierbei die Feststellung, dass die Maximalwerte entlang des Diffusors ziemlich genau konstant bleiben,
- die rasche Zunahme der relativen Turbulenzintensität, mit Maxima am Rande der viskosen Unterschicht,
- die starke Abschwächung der radialen Normalspannung $\overline{\rho u_r^2}$ und der turbulenten Schubspannung $-\rho \overline{u_x u_r}$ im Wandgebiet, mit dem konsequenten schnellen Abfall der Wandschubspannung τ_w entlang des Diffusors,
- der positive Gradient der turbulenten Schubspannungs-Profile (nahezu linearer Verlauf !) in Wandnähe entsprechend dem positiven longitudinalen Druckgradienten dp/dx ($\partial\tau/\partial y \neq dp_w/dx$ wegen der nicht vernachlässigbaren Trägheitskräfte),
- die schwache Zunahme des absoluten Turbulenzgrades innerhalb des noch ungestörten und nahezu isotropen Strömungskernes.

Die Resultate von Versuchsanordnung ② (dünne Eintrittsgrenzschicht) zeigten noch deutlicher, dass der (anfänglich noch vorhandene) typische Wandcharakter des turbulenten Geschwindigkeitsprofils im Diffusor nicht lange erhalten bleibt. Genaue Auskunft darüber vermag praktisch nur noch die Hitzdrahtmessung zu geben, da die massgebende Wandschicht, bei derart hohen

Reynoldszahlen, für Pitotrohre zu dünn ist, siehe Clauser-Diagramm. Die "wake"-Zone des Geschwindigkeitsprofils wird dominant und der ungewöhnliche Profilverlauf am Rand der viskosen Unterschicht verrät einen starken Einfluss der Trägheitskräfte auf die unmittelbare Wandströmung.

Das bei Versuchsanordnung ③ (dicke Eintrittsgrenzschicht) charakteristische Zusammenwachsen der turbulenten Scherzonen im Diffusor scheint sich primär auf die Turbulenz auszuwirken. Der Turbulenzgrad auf der Diffusorachse steigt in Strömungsrichtung rasch an und die Turbulenz wird deutlich anisotrop, (wobei $\overline{u_x^2}(0) > \overline{u_\varphi^2}(0) = \overline{u_r^2}(0)$). Von Bedeutung dürfte auch das nun eintretende Abklingen der absoluten Schwankungs-Intensitäten im Zentrum der Scherzone sein, was auf einen veränderten Turbulenz-Produktionsmechanismus schliessen lässt.

B) Fall der stark turbulenten Kernströmung

Durch diese Experimente ist es gelungen, neuartige Aspekte der turbulenten Grenzschichtströmung zu zeigen. In Bezug auf den Diffusor handelte es sich dabei um die Erforschung der Einflüsse eines bisher wenig beachteten Eintritts-Parameters, des Turbulenzgrades der Kernströmung.

Zur Verwirklichung der stark turbulenten, möglichst homogenen Diffusor-Eintrittsströmung wurde eine plötzliche Rohrerweiterung (Borda/Carnot-Strömung) herangezogen. Die besonderen Eigenschaften dieses Strömungsfeldes waren einer näheren Untersuchung wert, da sie von grossem praktischen Interesse sind (ausserordentlich rascher turbulenter Mischvorgang). Die Variation der Mischrohr-Länge (wobei $L_{BC}/D_E \geq 6$) wurde zur Aenderung des Turbulenzgrades am Diffusoreintritt verwendet.

Die Analyse der Strömung im Mischungsrohr ergab im Vergleich zur Rohrlaufströmung bei schwachturbulentem Kern folgende Haupt-Unterschiede:

- die Struktur des Grenzschichtprofils ist stark verändert (Abwesenheit der intermittenten Aussen-Zone, viel grössere Wandschubspannung, ungewöhnlich niedriger Wert des Formparameters H),
- die Turbulenz ist wesentlich homogener, mit Tendenz zur Isotropie in der eigentlichen Kernzone,
- die Turbulenz befindet sich in einem ausgeprägten Ungleichgewicht-Zu-

stand (sichtbar am starken Abklingen der Intensität in Strömungsrichtung) und ist durch starke radiale turbulente Spannungen in Wandnähe charakterisiert,

- der statische Druck weist relativ grosse Variationen senkrecht zur Strömungsrichtung auf (Unterdruck auf der Rohrachse),
- die Rotationssymmetrie der Strömung ist (selbst innerhalb der Grenzschicht) nahezu perfekt (Abwesenheit der transversalen Grenzschicht-Struktur).

Bei hochturbulenter Kernströmung am Eintritt des Diffusors nähert sich die Entwicklung des mittleren Strömungsfeldes derjenigen im reibungsfreien Fall wesentlich stärker als bei schwachturbulentem Eintrittskern. Man kann z.B. gut beobachten, wie:

- das Geschwindigkeitsprofil viel völliger bleibt und keinen Wendepunkt mehr aufweist (trotz dem steilen Druckanstieg bleiben die Werte des Formparameters H sehr klein),
- die radiale mittlere Geschwindigkeitskomponente U_r relativ gross bleibt, mit Maximalwerten näher der Wand (Anzeichen einer gleichmässigen Ausbreitung der Strömung),
- die absolute Intensität der nahezu homogenen Turbulenz in Strömungsrichtung überall abklingt, ohne die anfängliche Anisotropie zu verlieren,
- die relative Turbulenzintensität in Wandnähe niedrigere Werte erreicht (wegen der grösseren lokalen Geschwindigkeitsbeträge),
- die Verteilung der Reynolds'schen Schubspannung $-\rho \bar{u}_x \bar{u}_r$ gegen Diffusorende gleichmässig wird und der radiale Gradient in Wandnähe nirgends mehr konstant ist (theoretische Voraussetzung für ein "erweitertes" Wandgesetz nicht erfüllt),
- die Wandschubspannungen τ_w infolge des wirksameren turbulenten Impulsaustausches zwischen Aussenströmung und Wandströmung wesentlich höher liegen,
- das Strömungsfeld (durch das Fehlen der transversalen Grenzschichtstruktur) seine ausgezeichnete Eintrittssymmetrie bis zum Diffusorende behält, vergleiche Subvariante $L_{BC}/D_E=8,75$,
- der Druckrückgewinn, bei gleicher Grenzschicht-Verdrängungsdicke am Diffusoreintritt, wesentlich höher (nahe dem des idealen Diffusors) als

- bei turbulenzarmer Kernströmung ausfällt,
- diese durchaus wünschenswerte Strömungseigenschaften im Diffusor auch mit niedrigeren Turbulenzgraden der Aussenströmung sich realisieren lassen, vergleiche Variante $L_{BC}/D_E=18,75$ mit $\sqrt{u_x^2}/u_x(0)=4\%$.

Gestützt auf diesen Beobachtungen lässt sich behaupten, dass Diffusoren in der Praxis, bei sonst gleichen Eintrittsbedingungen, besser arbeiten werden, wenn ihre Kernströmung turbulent ist. Die Anwendbarkeit der Kernturbulenz zur Strömungs-Verbesserung (Austrittsverteilung) in bestehenden Diffusoren ist naheliegend. Eine Erhöhung des Wirkungsgrades ist jedoch nur bei schlecht arbeitenden Diffusoren denkbar, da mit der künstlichen Turbulenzerzeugung beträchtliche Eintritts-Druckverluste in Kauf zu nehmen sind.

VI.4 Strömungsbilanzen und Wandströmung

Die Prüfung der Massenstrombilanz erlaubt eine (bedingte) Aussage über die Genauigkeit der durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen (U_x - und U_r -Komponenten). Sie kann über lokale Verhältnisse nur grobe Anhaltspunkte geben und erweist sich überdies auf kleine Abweichungen von der Strömungssymmetrie (wie die transversale Grenzschichtstruktur), Turbulenz-Korrekturen der Messresultate, absolute Geschwindigkeits-Messung in der Kernströmung, sowie auf mögliche Auswertefehler (graphische Differentiation) sehr empfindlich.

Bei Berücksichtigung dieser Effekte zeigte sich die pauschale Massenstrombilanz für alle Varianten recht gut erfüllt. Der Vergleich lokaler Bilanzergebnisse mit Messresultaten aus der X-Sonde im Fall von $U_r(r)$ ergab, dass die direkte Messung der radialen Strömungsgeschwindigkeit mindestens so genau wie die indirekte Bestimmung aus der Kontinuitätsgleichung sein kann.

Die Auswertung der Impulsstrom-Bilanzen in longitudinaler und radialer Richtung ermöglichte rechnerische Kontrollen für den Verlauf der lokalen Wandschubspannung $\tau_w(x)$ bzw. des radialen statischen Druckes $p(x,r)$ innerhalb des Diffusors.

Im Fall von τ_w liessen sich bedeutsame Einflüsse der unperfekten Strömungssymmetrie und der starken Turbulenz-Intensität auf die Bilanzergebnisse nachweisen. In Uebereinstimmung mit Thompson [16] stellte sich heraus,

dass die Unsymmetrie der Grenzschicht die Hauptverantwortung für die gewöhnliche Diskrepanz zwischen Rechnung und Messung trägt.

Der Einfluss der turbulenten Zusatzterme (Gradient der longitudinalen Normalspannung und radiale Variation des statischen Druckes) zeigten sich im vorliegenden Fall (schwachdivergenter Diffusor) weniger wichtig (nahezu gleichgrosse Korrektur-Beiträge entgegengesetzten Vorzeichens).

Im Fall der radialen Druckverteilung konnte die grosse Empfindlichkeit der statischen Sonde auf Strömungsinterferenzen (Diffusoreintrittsgebiet) und auf hohe Turbulenzintensität (Diffusorende) gezeigt werden. Die relativ grosse Turbulenzskala verursacht eine merkliche Ueberschätzung des turbulenten Unterdruckes im Zentrum der betrachteten Scherzonen.

Die saubere Ermittlung der Wandschubspannung entlang des Diffusors erhielt im Hinblick auf eine Diskussion des bei Druckanstieg noch stark debattierten Wandgesetz-Problems spezielle Aufmerksamkeit. Es wurden zuerst die Resultate von vier klassischen Messmethoden miteinander verglichen:

- Die Ludwig/Tillmann-Formel zeigte sich in guter Uebereinstimmung mit den Wandgesetz-Methoden (Prestonrohr, Clauser-Diagramm), solange eine turbulenzarme Kernströmung vorlag. Bei starkturbulenter Kernströmung dürfte sie (aufgrund des ungewöhnlichen Formparameters der entsprechenden Geschwindigkeitsprofile) kaum vertretbar sein.
- Bei den zwei erwähnten Wandgesetz-Methoden, die prinzipiell übereinstimmen sollten, ergaben sich zunehmende Abweichungen gegen Diffusorende (Turbulenzeinflüsse auf das Prestonrohr) und vor allem im Fall einer turbulenten Kernströmung (universelles Wandgesetz-Modell schlecht brauchbar). Das Prestonrohr scheint dabei die Wandschubspannung systematisch zu überschätzen. Das Clauser-Diagramm liefert seinerseits bei Druckanstieg keine eindeutigen τ_w -Werte mehr (Profilverlauf im relevanten Gebiet der (nominal) logarithmischen Schicht nichtlinear). Bei Hitzdraht-Messungen erlaubt es aber einen guten Ueberblick über die Stärke der vorliegenden Wandgesetz-Abweichungen (siehe Profilverlauf in der angrenzenden viskosen Unterschicht).
- Die schon beschränkte Genauigkeit der X-Sonden-Methode (lineare Wandextrapolation des $\overline{u_x u_r}$ -Profils) zeigte sich beim Diffusor, infolge des

starken Trägheitseinflusses auf die Wandströmung ($\partial\tau/\partial y \neq dp_w/dx$), weiter beinträchtigt (wandextrapolierter τ -Wert $\equiv \tau_0 \neq \tau_w$).

Die Hitzdrahtmessung des Geschwindigkeitsprofils innerhalb der viskosen Unterschicht und seine Wandextrapolation (Profilneigungs-Methode) wurde trotz manchen experimentellen Schwierigkeiten als die einzige vertretbare τ_w -Messmethode gefunden. Ihre Ergebnisse erwiesen sich mit denen aus erweiterten Wandgesetz-Lösungen konsistent. Diese Resultate bestätigen, dass die effektive Wandschubspannung niedriger sein muss, als von Prestonrohr- und Clauser-Methode angegeben. Allerdings wird auch die Profilneigungs-Methode gegen die Ablösung hin unsicher (intermittente Rückströmung, thermische Wandinterferenz). Für solche Strömungsgebiete scheint noch keine befriedigende τ_w -Messmethode zu existieren.

Die Gegenüberstellung von Hitzdraht- und Pitotrohr-Messungen für die Wandzone entlang des Diffusors ($dp/dx > 0$) liess eine weitgehende Abweichung vom universellen Geschwindigkeitsprofils erkennen. Die vermutbare Ungültigkeit des "universellen" Wandgesetzes konnte nach genauerer Analyse der Hitzdrahtresultate im Gebiet der viskosen Unterschicht nachgewiesen werden. Die Möglichkeit von relevanten systematischen Messfehlern (Interferenz-Effekte) scheint im Diffusoreintritts-Gebiet ausgeschlossen, während die Glaubwürdigkeit der Hitzdrahtergebnisse gegen Diffusorende diskutabel wird.

Theoretische Betrachtungen zeigen, dass bei derart starker Verzögerung der Grundströmung Druck- und Trägheitskräfte bis in den wandnächsten Strömungsschichten spürbar sind (siehe Abschnitt V.5.2). Demzufolge wird das lokale Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit von "externen" Strömungsparametern (wie $\Delta p = (\nu/\rho u_\tau^3) dp_w/dx$ oder $\Delta_\tau = (\nu/\rho u_\tau^3) \partial\tau/\partial y$) modifiziert. Neuentwickelte Theorien, welche diese Einflüsse berücksichtigen, führen zu analytischen Lösungen für das wandnahe Geschwindigkeitsprofil (erweitertes Wandgesetz), welche mit den hier erhaltenen Messresultaten in gutem Einklang stehen.

Die Ausdehnung der Betrachtungen auf die stark turbulente (ablösungsnahe) Wandströmung der Diffusorendzone lässt aber erkennen, dass bei derartigen Strömungssituationen nicht nur die Messtechnik, sondern auch die Theorie an die Grenze ihrer heutigen Möglichkeiten gelangen. Andere Strömungsmodelle werden hier und für den Fall der Grenzschicht bei turbulenter Ausströmung benötigt.