

Untersuchung der Strömungsablösung in dreidimensionalen, runden Diffusoren mit Hilfe numerischer Strömungssimulation

Dipl. Ing. Dr. Michael Harasek und Christian Jordan

Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik, Technische Universität Wien,
Dezember 1999

Zusammenfassung

In dreidimensionalen, kreisrunden Diffusoren mit konstantem Verhältnis der Einlauf- und Auslaufquerschnitte wurden die Aufweitungswinkel variiert, um festzustellen, ab welchem keine Strömungsablösung mehr auftritt. Als Kriterium für das Vorhandensein einer Grenzschichtablösung wurde das Auftreten einer Rückströmung im Diffusorteil bewertet. Die Untersuchung wurde durch Simulation einer Gasströmung (ideales Gas) mit Hilfe des kommerziellen CFD-Programmes FLUENT durchgeführt.

Einleitung

Die CFD (Computational Fluid Dynamics, Numerische Strömungssimulation) bietet heute vielfach schon die Möglichkeit, teure praktische Versuche zu ersetzen. FLUENT 5.1.1 von der Firma FLUENT Inc. ist ein kommerzieller "General Purpose"-CFD-Solver, der auf dem Finite-Volumen-Prinzip beruht und in der Lage ist, sowohl mit strukturierten als auch mit unstrukturierten Netzen zu arbeiten (Details unter [4]).

Bei der Literaturrecherche für die Untersuchung einer technischen Anlage mit interner Gasströmung hat sich herausgestellt, daß zwar das Verhalten von zweidimensionalen Diffusoren (entspricht einem dreidimensionalen Diffusor mit Rechteckquerschnitt) bei der Variation des Öffnungswinkels hinreichend untersucht ist (siehe beispielsweise [1], [2] und [3]), es aber keine Arbeiten über Grenzwinkel für die Ablösung im dreidimensionalen Bereich gibt.

Ausführung, Randbedingungen

Um wenigstens einige Anhaltspunkte über die Größenordnung des Rückströmbereiches ("stalling") zu erhalten, wurde anhand einer einfachen Geometrie eine Gasströmung simuliert¹. Die Geometrie wurde mit dem Preprocessor GAMBIT der Firma FLUENT Inc., welcher ein einfaches CAD-Programm enthält, gezeichnet und mit einem strukturierten, hexagonalen Diskretisierungsgitter versehen, welches mittels Durchziehen und Projektion eines Rechteckgitters auf der Einlauffläche erhalten wurde ("Cooper-Meshing"), siehe auch Abbildung 1. Der Einlaufdurchmesser des Konus betrug 0,1 m und der Durchmesser des Austrittes 0,7 m. In der simulierten Geometrie wurde weiters ein Zulaufteil mit Verjüngung (größter Durchmesser des Einlaßteiles 0,2 m) und ein zylindrischer Ableitungsteil verwendet, sodaß die gesamte Rohrlänge der simulierten Geometrie konstant 10 m betrug. Die verwendeten Aufweitungswinkel (halbe Öffnungswinkel des Konusteiles) können der Tabelle 1 entnommen werden.

Weiters wurde versucht, den Effekt eines nichtausgebildeten Strömungsprofils auf die Ablöseigenschaften zu untersuchen. Dies wurde vereinfacht dadurch dargestellt, daß der Zulaufteil der simulierten Geometrie weggelassen wurde, und die Parallelströmung mit konstanter Geschwindigkeit direkt auf den Konuseinlauf aufgegeben wurde.

¹Die Simulationen wurden auf dem Rechner cfd.zserv.tuwien.ac.at des ZID der TU Wien durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine Anlage auf Basis von 6 ALPHA 21264 CPUs (525 MHz) und 8 GB RAM (shared Memory).

Aufweitungswinkel	Länge Aufweitungskonus	Länge Austrittsrohr	$\frac{L_{Konus}}{d_{ein}}$	Anmerkungen
10°	1,4 m	7,5 m	7,0	genau 10,13°
15°	0,933 m	7,967 m	4,67	-
20°	0,687 m	8,213 m	3,44	-
25°	0,536 m	8,364 m	2,68	-
30°	0,433 m	8,467 m	2,17	-
7,5°	1,899 m	7,001 m	9,50	-
5°	2,859 m	6,041 m	14,30	-
2,5°	5,726 m	3,174 m	28,63	-
7,5°	1,899 m	7,001 m	9,50	ohne Einlauf
5°	2,859 m	6,041 m	14,30	ohne Einlauf
2,5°	5,726 m	3,174 m	28,63	ohne Einlauf

Tabelle 1: Verwendete Aufweitungswinkel

Gerechnet wurden die Geometrien mit einer Luftströmung², die als ideales Gas simuliert wurde (Einlaufgeschwindigkeit 10 m/s, Molekularmasse $M_{gas} = 29,966$ kg/kmol, konstante Gasviskosität von $\eta_{gas} = 1,789 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, Temperatur $T_{abs} = 443$ K, Umgebungsdruck von $p = 101,3$ kPa, Wandrauigkeit 0,001 m, Schwerkraft in z-Richtung $-9,81$ m/s²). Aufgrund der Formel der Idealgasgleichung ($\rho = \frac{p \cdot M_{gas}}{R \cdot T_{abs}}$) ergibt sich die Gasdichte daher zu $0,797$ kg/m³. Die voraussichtliche Eintrittsgeschwindigkeit in den Konus betrug aufgrund der Kontinuitätsgleichung etwa 40 m/s, die Reynoldszahl (definiert für die Rohrströmung nach $Re = \frac{U_{ein} \cdot L_{charakteristisch} \cdot \rho_{gas}}{\eta_{gas}}$) liegt in der Größenordnung von 180.000, die Strömung ist daher eindeutig turbulent.

Konvergenz wurde nach skalierten, nicht normierten Residuen bewertet, es wurde das Standardkonvergenzkriterium von FLUENT verwendet, welches verlangt, daß alle Residuen unter 10^{-3} (Energiebilanz ; 10^{-6}) liegen müssen, welches nach 250 bis 300 Iterationsschritten mit einer mittleren Iterationszeit von 10-12 Sekunden pro Iteration erreicht wurde. Das erhaltene Strömungsbild (mit Ablösung) kann exemplarisch Abbildung 2 entnommen werden. Ein Vergleich der Geschwindigkeitsprofile ist den Abbildungen zu entnehmen. Die wesentlichsten Rechenergebnisse (statische Druckverluste Eintritt-Austritt, maximale Rückströmgeschwindigkeit) sind in Tabelle 2³ zusammengefaßt.

Ergebnisse

Deutlich ist zu erkennen, daß der statische Druckverlust im Diffusor ganz im Einklang mit der Theorie mit Verkleinerung des Aufweitungswinkel abnimmt. Bei Aufweitungswinkel über 5° ist eindeutig eine Grenzschichtablösung der Strömung und ein Umkippen des Strahles zu bemerken, wodurch ein Rückströmungsbereich ausgebildet wird. Die Ablösung tritt immer bereits im unteren Teil (unterstes Drittel) des Konus auf. Bei einem Öffnungswinkel von 15° ist eine zweiseitige Ablösung festzustellen, ein zentrischer, elliptischer Freistrahle (Jet) tritt auf, was aber wahrscheinlich ein Rechenartefakt ist; bei 20° und darüber ist wieder ein schärferes Umknicken zu bemerken (gemäß Literatur ist bei größeren Winkeln aber wieder Tendenz zu einem zentrischen Jet zu erwarten, mit allseitiger Wirbelbildung; Extremfall: Aufweitungswinkel 90°, entspricht einem Stufenübergang von kleinem zu großem Querschnitt).

Die maximale Geschwindigkeit in diesem Bereich steigt zwar bis zu einer Aufweitung von 20° an, scheint sich dann auf diesem Wert von etwa 8 m/s zu stabilisieren. Die Grenze der Ablösung liegt bei diesen geometrischen Randbedingungen (mit und ohne Einlaufrohr) jedenfalls zwischen 5° und 7,5°, was deutlich niedriger ist als bei den Meßergebnissen für die zweidimensionalen Diffusoren (siehe bei [3]). Unterhalb dieser Grenzwinkel ist das Geschwindigkeitsprofil der Strömung entsprechend den Erwartun-

²Bei allen weiteren Einstellungen wurden die FLUENT-Defaultwerte verwendet.

³Hinweis: Die negativen Druckverluste ergeben sich durch die typische Diffusorwirkungsweise (Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit und Erhöhung des Staudruckes).

gen für eine turbulente Rohrströmung und die Aufwärtsströmung füllt den gesamten Querschnitt des Konusteiles aus.

Zu erwähnen ist jedenfalls, daß die Simulation mit CFD nur Momentaufnahmen der Strömung liefert, und das zeitlich schwankende Verhalten mit dieser Methode nicht aufgezeigt werden kann. Die Abbildungen stellen jeweils das stabilste, überwiegende Bild dar (höchste Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Rückströmzone), das durch zeitliche Mittelung bei einer realen Apparatur erhalten werden könnte.

Winkel	Druckverlust	Rückströmung
10°	248 Pa	max. 5,8 m/s
15°	275 Pa	max. 5,7 m/s
20°	339 Pa	max. 8,2 m/s
25°	376 Pa	max 7,7 m/s
30°	401 Pa	max. 7,7 m/s
7,5°	220 Pa	max. 4,5 m/s
5°	192 Pa	keine
2,5°	185 Pa	keine
7,5° (ohne Einl.)	-471 Pa	max. 4,0 m/s
5° (ohne Einl.)	-492 Pa	keine
2,5° (ohne Einl.)	-498 Pa	keine

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulationen

Ausblick

Die Effekte von nichtausgebildeter Einlaufströmung können aufgrund der vorliegenden Rechenergebnisse nicht bewertet werden, weitere Untersuchungen mit verschiedenen Einlauffängen sollen durchgeführt werden. Weiters wird der Aspekt unterschiedlicher Diffusorgeometrie und Strömungsgeschwindigkeiten betrachtet.

Literatur

- [1] Schetz, J. A.; Fuhs, A. E.: Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery, Volume I; John Wiley & Sons, New York, 1996
- [2] Carlson, J. J.; Johnston J. P.; Sagi C. J.: Effects of Wall Shape on Flow Regimes and Performance in Straight, Two-Dimensional Diffusers; Journal of Basic Engineering Trans ASME, March 1967, p. 151 ff
- [3] Reneau, L. R.; Johnston, J. P.; Kline S. J.: Performance and Design of Straight, Two-Dimensional Diffusers; Journal of Basic Engineering Trans ASME, March 1967, p. 141ff
- [4] FLUENT Inc.: FLUENT 5 User's Guide Volume 1-4; FLUENT Inc. Lebanon, USA 1998

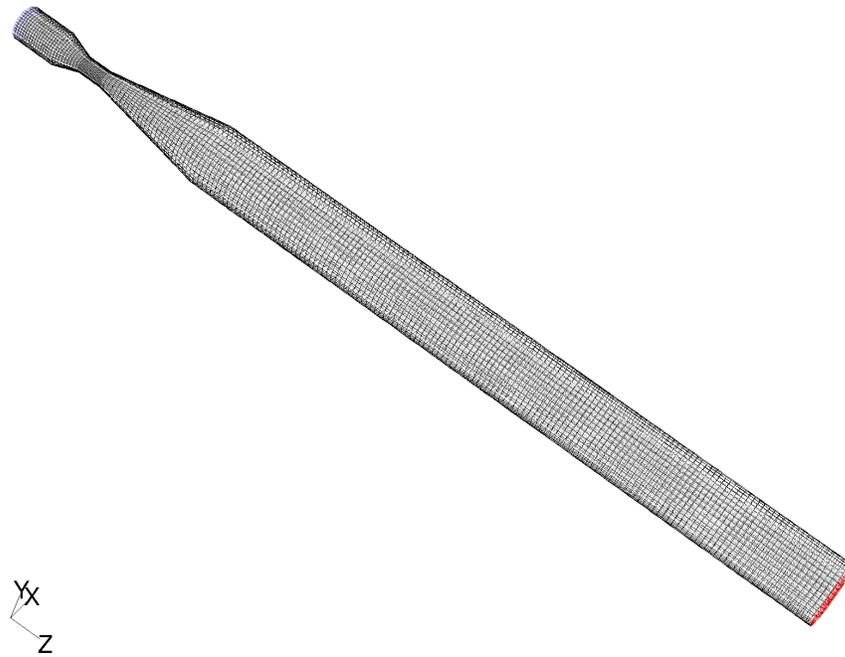


Abbildung 1: Rechengeometrie mit Gitter (Aufweitungswinkel 10° , etwa 30.000 Zellen)

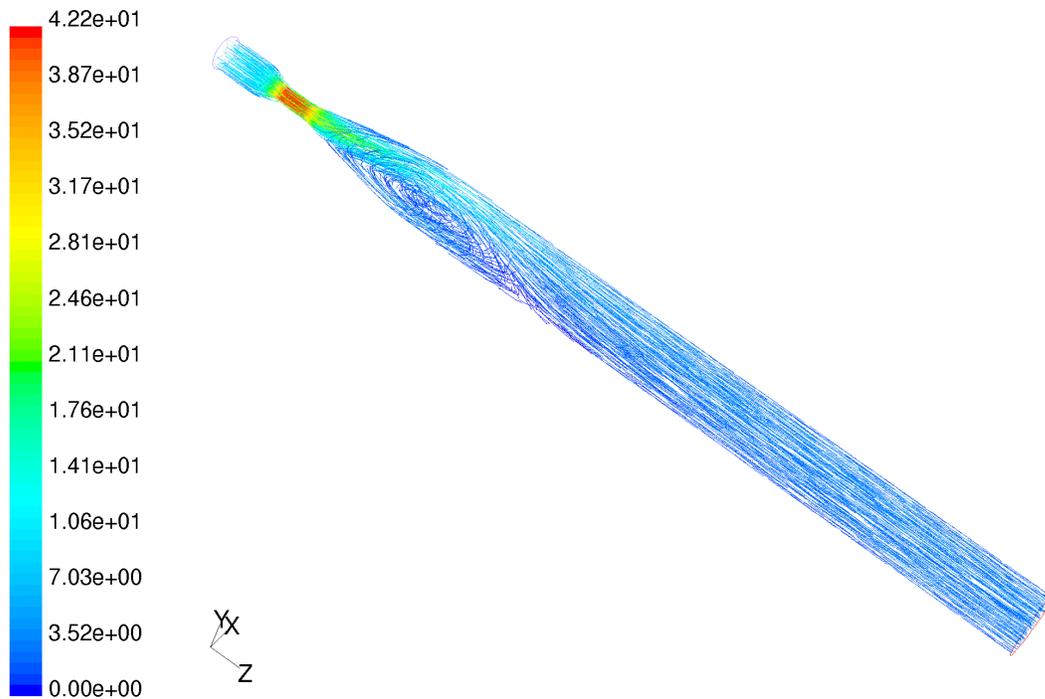


Abbildung 2: Stromlinien im Diffusor (Farbgebung nach Absolutgeschwindigkeit)

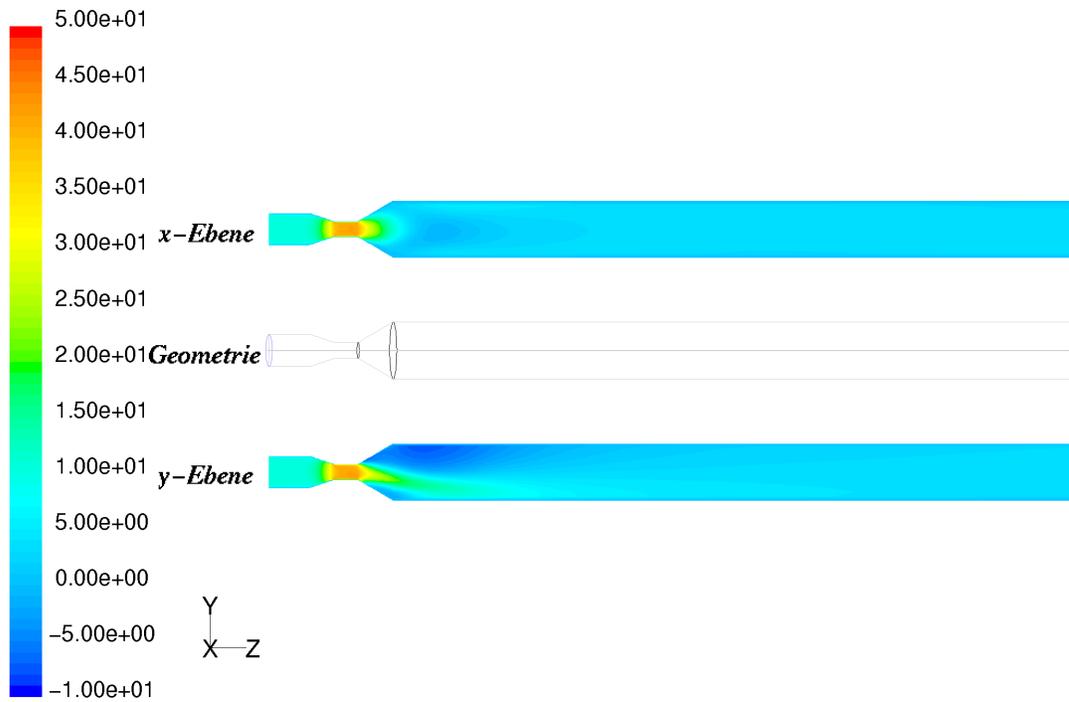


Abbildung 3: Z-Geschwindigkeitsprofil (Aufweitungswinkel 30°)

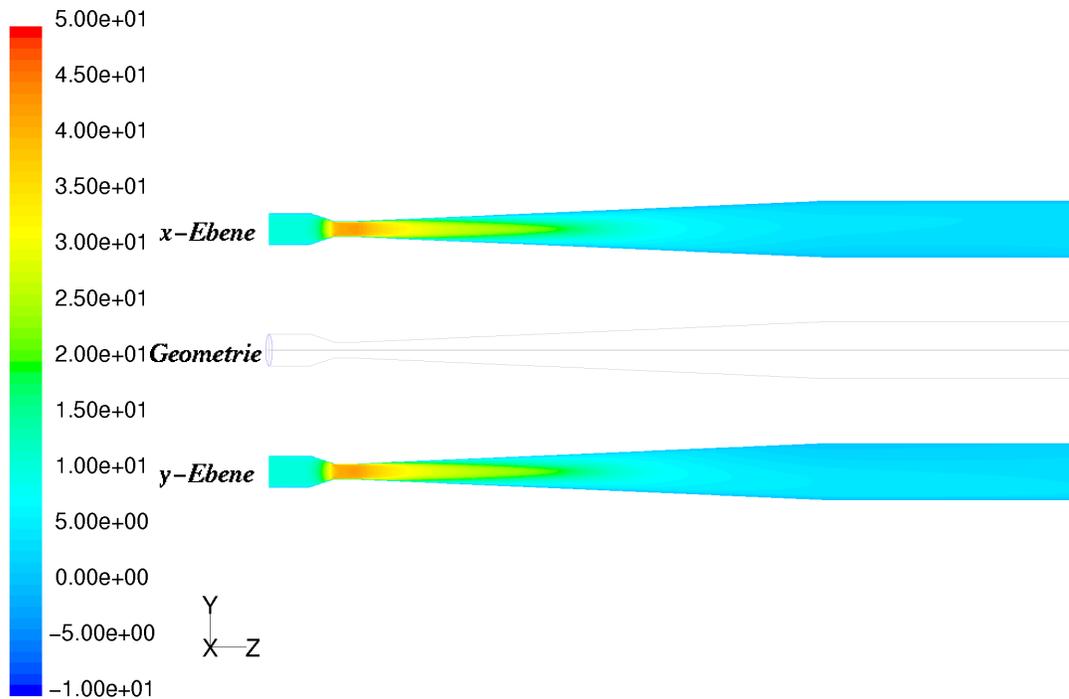


Abbildung 4: Z-Geschwindigkeitsprofil (Aufweitungswinkel 2,5°)