

Dr. Thomas Frank¹, Dr. Jordan A. Denev², Dipl.-Ing. Klaus Pachler¹

¹ FG Mehrphasenströmungen, Prof. Techn. Thermodynamik, TU Chemnitz

² Lehrstuhl für Hydroaerodynamik, Technische Universität Sofia, Bulgarien

Large Eddy Simulation (LES) der Gas-Feststoff-Strömung in einem Standardzyklon

Die Trennung bzw. Abscheidung von Feststoffpartikeln aus Fluiden spielt in Prozessen der Energie- und Verfahrenstechnik häufig eine entscheidende Rolle. Desgleichen ist die Partikelabscheidung aus Gasströmungen eine zentrale Aufgabenstellung in der Luft- und Umwelttechnik sowie in der Nanopartikeltechnologie, wengleich sich die zu betrachtenden Partikelgrößen und -konzentrationen bei diesen Anwendungen meist um Größenordnungen von den Verhältnissen in verfahrenstechnischen Prozessen unterscheiden.

Ein weit verbreitetes Verfahren zur Partikelabscheidung ist die Fliehkraftabscheidung von Partikeln aus Gasen oder Flüssigkeiten mit Hilfe einer Wirbel-Senken-Strömung, wie sie in sogenannten Zyklonen realisiert wird, die in vielen unterschiedlichen Bauformen eingesetzt werden. Auch wenn die moderne numerische Strömungsmechanik (CFD) in den letzten zehn Jahren zu einem weithin anerkannten Forschungs- und Entwicklungs-Werkzeug geworden ist, so stößt die numerische Simulation der Zyklonströmung mit den heutzutage am weitesten verbreiteten numerischen Modellen auf Schwierigkeiten. Eine ganze Reihe von Publikationen zeigt, daß die Verteilung der Gasgeschwindigkeiten im Standardzyklon (insbesondere die Verteilung der Umfangskomponente der Gasgeschwindigkeiten) mit den vielfach angewendeten Zweigleichungs-Turbulenzmodellen, wie z.B. dem Standard- $k-\varepsilon$ -Modell oder dem $k-\omega$ -Modell, nicht zufriedenstellend wiedergegeben werden kann. Dies ist in erster Linie auf die starke Stromlinienkrümmung und den anisotropen Charakter der turbulenten Wirbel-Senken-Strömung in Zyklonen zurückzuführen, der von den Zweigleichungs-Turbulenzmodellen modellbedingt nicht wiedergespiegelt werden kann. Erst mit Turbulenzmodellen höherer Ordnung gelingt eine numerische Berechnung der Zyklonströmung, die einen zufriedenstellenden Vergleich mit detaillierten LDA-Meßergebnissen erlaubt. Derartige Simulationsrechnungen mit Reynoldsspannungs-Turbulenzmodellen (RSM) sind u.a. von Boysan & Swithenbank [1], von Gorton-Hülgerth & Staudinger [4,5] sowie von Hoekstra, Derksen & Van Den Akker [3] bekannt.

In der vorliegenden Arbeit wurde nun der Versuch unternommen, die Gas-Feststoff-Strömung in einem Standardzyklon mit der Methode der Grobstruktursimulation (LES – Large Eddy Simulation) zu berechnen. Hierzu wurde das bestehende vollständig parallelisierte Berechnungsverfahren MISTRAL/PartFlow-3D [2] in geeigneter Weise erweitert. Die Grobstruktursimulation der zeitabhängigen, 3-dimensionalen und turbulenten Gasströmung im Standardzyklon basiert auf der direkten Berechnung der raum-zeitlichen Entwicklung der großen Skalen (turbulente Grobstruktur) durch Lösung der zugehörigen Erhaltungsgleichungen und der Modellierung der kleinen Skalen des turbulenten Strömungsfeldes (turbulente Feinstruktur). Voraussetzung für die Auflösung der turbulenten Grobstruktur ist ein hinreichend feines Gitternetz, das im vorliegenden Fall für den untersuchten Standardzyklon mehr als 1,5 Millionen Kontrollvolumen aufwies. Für die Modellierung der – bezogen auf die Maschenweite des Gitternetzes – kleinen und größtenteils isotropen Turbulenzskalen (Feinstruktur-Spannungstensor) kam ein Standard-Smagorinsky-Modell zum Einsatz. Ferner wurde für die Reduzierung der

¹Email: DrTh.Frank@arcor.de, WWW: <http://home.arcor.de/drth.frank>

Feinstruktur-Länge in der Nähe fester Wände eine Van-Driest-Dämpfungsfunktion verwendet.

Für die eigentliche LES und die darauf aufbauende Partikelsimulation wurde eine 48-Processor-Partition des Chemnitzer Linux-Clusters (CLIC; Pentium III, 800 MHz) eingesetzt, auf der für die parallele Berechnung der Zyklonströmung 256,5 Stunden Rechenzeit benötigt wurden. Zur Gewinnung des zeitlich gemittelten Strömungsfeldes wurde eine Mittelung der Geschwindigkeitsfelder über insgesamt 30.000 Zeitschritte vorgenommen und die Ergebnisse dieses Mittelungsprozesses wurden anschließend mit den LDA-Meßergebnissen von Gorton-Hülgerth [4] verglichen. Dabei konnte für die Verteilungen der drei Geschwindigkeitskomponenten der Gasphase über einen radialen Schnitt der Zyklongeometrie eine überwiegend gute Übereinstimmung mit den Meßwerten festgestellt werden. Der Vergleich mit den Ergebnissen einer Strömungsfeldberechnung mit einem Standard- $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell zeigt die mit der LES erzielbare deutliche Verbesserung des berechneten Strömungsfeldes im Standardzyklon.

Für die Berechnung der Partikelabscheidung wurde das in MISTRAL/PartFlow-3D integrierte Lagrange-Lösungsverfahren eingesetzt. Prinzipiell unterstützt dieses Lösungsverfahren sowohl die stationäre als auch die instationäre Berechnung der Partikelbahnen auf einem auf geeignete Weise berechneten Fluidströmungsfeld. Im vorliegenden Fall wurde jedoch aus Zeitgründen und Gründen der Stabilität der doch sehr lange dauernden Simulation auf eine simultane instationäre Berechnung der Partikelbewegung verzichtet. So wurde im Anschluß an die LES eine auf dem zeitlich gemittelten Strömungsfeld basierende Berechnung der Partikelabscheidung im Standardzyklon vorgenommen. Hierfür wurden die Partikeltrajektorien von insgesamt 40.000 Partikeln in einem Größenbereich von $d_p = 0.6 \mu m$ bis $d_p = 10.0 \mu m$ in 20 Größenklassen hinsichtlich eines Abscheidekriteriums untersucht und daraus eine Trenngradkurve abgeleitet. Die so gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich der Partikelabscheidung wurden mit experimentellen Ergebnissen von König [5] verglichen.

- [1] Boysan F., Swithenbank J., Ayers W.H. : "Mathematical modelling of gas-particle flows in cyclone separators", Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol.4 Solids and Gas-Solids Flows, Chapter 42, Gulf Publishing Company, Houston, Texas (1986).
- [2] Frank Th. : "Parallele Algorithmen für die numerische Simulation dreidimensionaler, disperser Mehrphasenströmungen und deren Anwendung in der Verfahrenstechnik", Habilitationsschrift, Veröffentlicht im Shaker Verlag, Aachen, Reihe Strömungstechnik, 17 Tabellen, 126 Abbildungen, 356 Seiten, September 2002.
- [3] Hoekstra A.J., Derksen J.J., Van Den Akker H.E.A. : "An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones", Chemical Engineering Science, Vol. 54, pp. 2055-2065 (1999).
- [4] Gorton-Hülgerth A. : "Messung und Berechnung der Geschwindigkeitsfelder und Partikelbahn im Gaszyklon", VDI-Fortschritt-Bericht, Reihe 7, Nr. 357, (1999).
- [5] Gorton-Hülgerth A., Staudinger G. : "Dreidimensionale Strömungssimulation in einem Gaszyklon mit Reynolds-Stress-Modell", Chemie-Ingenieur-Technik, Vol. 71, No. 4, pp. 354-356 (1999).
- [6] König C. : "Untersuchungen zum Abscheideverhalten von geometrisch ähnlichen Zyklonen", Dissertation, Universität Kaiserslautern, Germany (1990).