

# Optimierung von Drallabscheidern mittels Strömungssimulation

C. MAIER, C. JORDAN, , A. FRIEDL, K. VARMUZA, M.HARASEK

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische  
Biowissenschaften der Technischen Universität Wien

Getreidemarkt 9/166, A-1060 Wien

Dezember 2005

Drallabscheider sind Apparate, die in Trägergasen mitgeführte Partikel oder Tröpfchen durch Aufprägen von Zentrifugalkräften in Wirbelströmungen abtrennen. Das resultierende Strömungsfeld beeinflusst den Partikelabscheidegrad und den Druckverlust wesentlich. Der Energiebedarf der Gebläse ist zum Druckverlust direkt proportional, daher werden Anstrengungen zur Minderung der Reibungsverluste unternommen. Anhand der Simulationsergebnisse wurde festgestellt, dass der von Vogelbusch entwickelte Leitapparat die Druckdifferenz über den Abscheider um 50% reduziert.

Eine neue Korrelation für die Vorhersage des Druckverlustes wurde unter Auswertung von Ergebnissen numerischer Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) mit den Methoden der multivariaten Regressionsanalyse entwickelt.

## 1. Einleitung

In dieser Arbeit wird die trockene Gasströmung in Drallabscheidern mit den Methoden der numerischen Strömungssimulation behandelt. Diese zyklonischen Apparate werden in Bioethanolproduktionsanlagen zum Abtrennen von Tröpfchen aus dem Trägergas in der Brüdenbehandlung eingesetzt. Aufgrund der eingesetzten Einbauten kommt es zu einer starken Veränderung des Strömungsfeldes (vgl. Abbildung 1), bekannte empirische Korrelationen für den Druckverlust von herkömmlichen Staubzyklonen können deshalb nicht auf die vorliegende Geometrieconfiguration angewendet werden (siehe auch [1] - [4]).

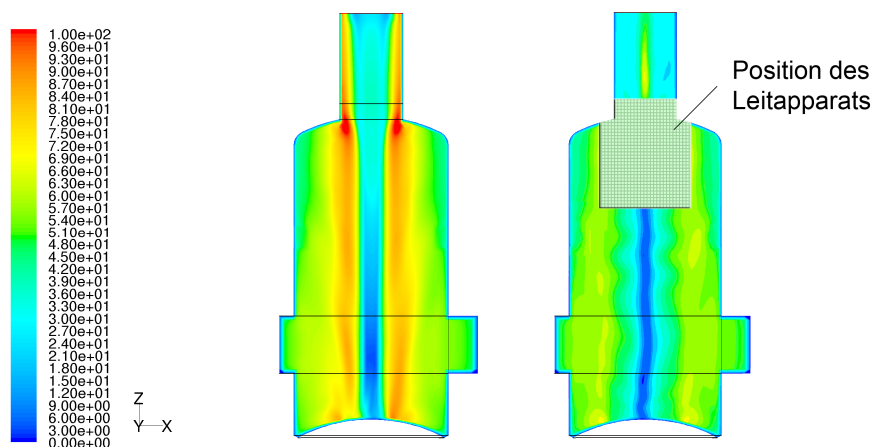


Abbildung 1: Typische Verteilung der Absolutgeschwindigkeit in Drallabscheidern: links mit, rechts ohne Leitapparat [m/s].

Für die Anlagenplanung und –auslegung ist eine rasche und zuverlässige Vorhersage des Druckverlustes sehr wichtig. Um den Einfluss der zahlreichen Geometrieparameter auf den Druckverlust in einer neuen Korrelation abbilden zu können, wurden 166 Geometrie- und Massenstromvarianten untersucht.

## 2. Hardware

Die Simulationsrechnungen wurden am Applikationsserver Compaq SC45 des Zentralen Informatikdienstes an der TU Wien durchgeführt. Dieses Multiprozessor-System besteht aus 10 Knoten mit jeweils 4 Alpha-EV68 Prozessoren (1 GHz Taktfrequenz, 8MB cache pro CPU). Jede CPU verfügt über mindestens 4 GB Hauptspeicher (für detailliertere Informationen siehe [5]).

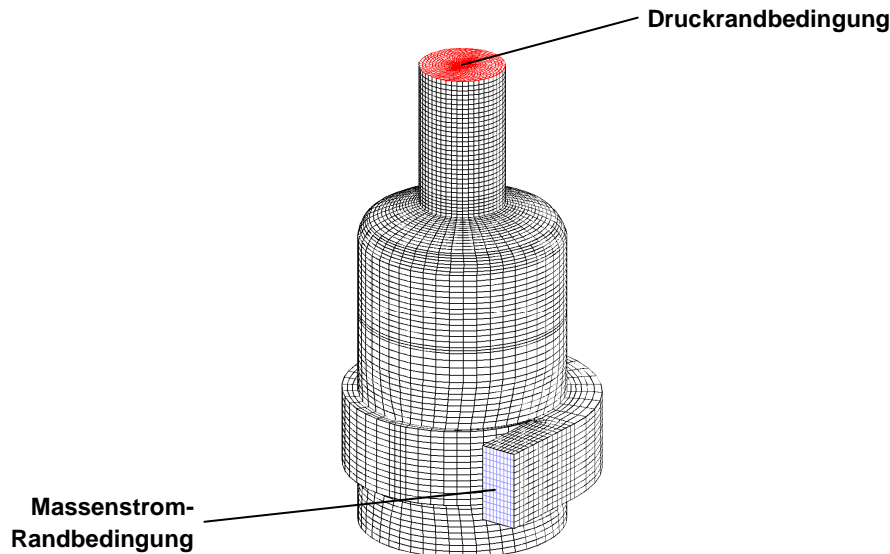
## 3. Modellimplementierung

Die Simulationen wurden mit der kommerziellen Software FLUENT™ in der Version 6.2.16 erstellt (siehe auch [6]). In diesem Programm werden Strömungen durch Lösen eines Satzes von Erhaltungsgleichungen (Massen-, Kräfte- und Energiebilanz) in diskreten Volumenelementen berechnet. Diese Gleichungen stellen nichtlineare partielle, gekoppelte Differentialgleichungen dar.

Das zur Geometrieerstellung erforderliche Pre-Processing erfolgte mit der CAD-ähnlichen Anwendung GAMBIT™, Version 2.1.12 (siehe [7]). In diesem vorbereitenden Arbeitsschritt wurde die betrachtete Geometrie erzeugt und die durchströmten Volumina anschließend durch Erstellung des Rechengitters diskretisiert (siehe Abbildung 2). Diese Grid – Generierung stellt einen wichtigen Schritt in der Simulation dar und muss unter Rücksichtnahme auf problemspezifische Einschränkungen und Anforderungen erfolgen. Die Rechengitter wurden so erstellt, dass die diskreten Volumenelemente (ca. 130.000 Zellen) möglichst gut nach der auftretenden Hauptströmungsrichtung ausgerichtet sind.

Es ist in GAMBIT™ möglich, Geometrien unter Verwendung von „Skripts“ automatisiert und parametrisiert zu erstellen. Dabei werden die während der Konstruktion eingegebenen Maße in einer Journal – Datei durch Variable ersetzt. Diese wird von GAMBIT™ routinemäßig aufgezeichnet und enthält eine sequentielle Auflistung aller durchgeführten Operationen. Diese modifizierte Befehlsabfolge kann dann von GAMBIT™ abgearbeitet werden. Auf diesem Wege wurden mit vertretbarem Aufwand 59 Geometrievarianten erstellt.

Die Behandlung der Randbedingungen an der Begrenzung des Strömungsfeldes (Ein- und Austritt, Wände) erfolgt in der numerischen Strömungssimulation unter Einsatz von entsprechenden Modellen. Dem Eintrittsquerschnitt des Abscheiders wurde eine Massenstromrandbedingung aufgeprägt, am Austritt erfolgte unter Anwendung einer Druckrandbedingung die Vorgabe des statischen Druckniveaus.



**Abbildung 2: Rechengitter, Ein- und Austrittsrandbedingung.**

Die Wandgrenzschichten wurden mit dem „Ungleichgewichts-Grenzschichtmodell“ behandelt. Dieses ist bevorzugt bei komplexeren Strömungsformen (wie die vorliegende Wirbelströmung) anzuwenden. In diesem Modell wird der Druckgradient in der Richtung parallel zur Wand berücksichtigt. Weiters wird die Grenzschicht in eine laminare Unterschicht und eine turbulente Oberschicht aufgeteilt und die Produktion und Vernichtung von turbulenter kinetischer Energie in beiden Teilschichten berechnet. Auf diese Weise wird das Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Dissipation von Turbulenzenergie in der Grenzschicht berücksichtigt.

Die Gasdichte wurde konstant angenommen, das heißt das Fluid als inkompressibel betrachtet. Es wurden also Mach-Zahlen vorausgesetzt, die klein gegen eins sind. Diese Vereinfachung erlaubt, dass von der Lösung der Energiegleichung (wäre zur Errechnung der Dichte mittels Idealgasgleichung erforderlich) abgesehen werden kann. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden einzelne Fälle unter Berücksichtigung der Kompressibilität gerechnet.

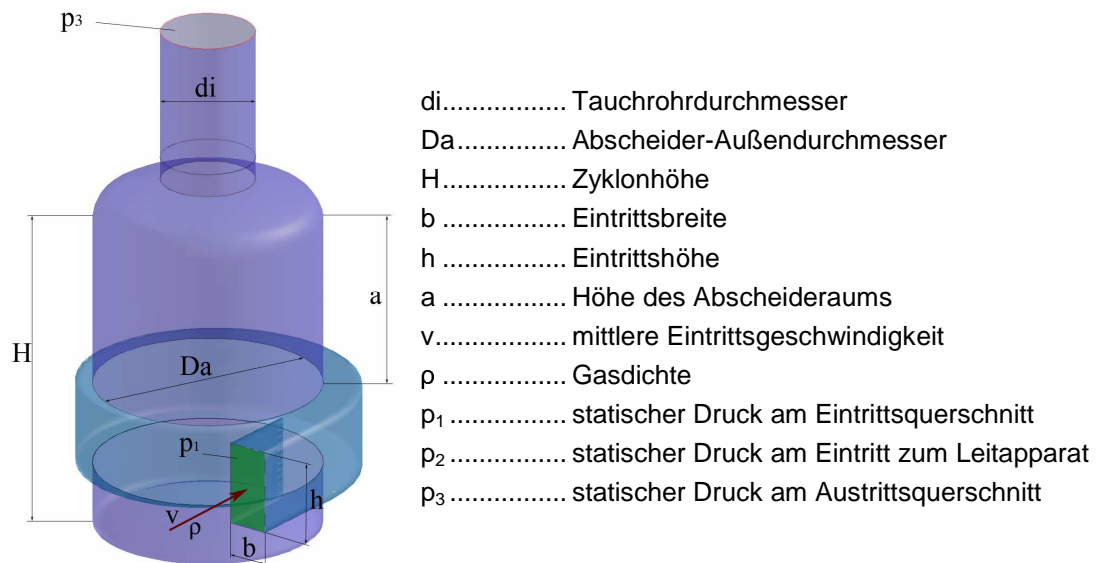
Das Strömungsfeld wurde – um den Rechenaufwand in vertretbarem Rahmen zu halten – stationär gelöst. Die instationären Schwankungsbewegungen der Strömung (= Turbulenz) wurden durch Einsatz des Reynolds-Stress – Turbulenzmodells (RSM) abgebildet. Dieses Modell kann die anisotropen Turbulenzen der Zyklonströmung abbilden. Der Effekt der Turbulenz erscheint nach dieser Methode als zusätzliche Spannungen, die die molekulare Viskosität ergänzen. Diese Spannungen werden als „Reynolds Spannungen“ (engl.: Reynolds stresses) bezeichnet und können als „turbulente Viskosität“ aufgefasst werden.

Unter der Annahme, dass mit dem Gas mitgeführte Tropfen nur einen kleinen Einfluss auf die Gasströmung ausüben, wurde die disperse Phase vernachlässigt und nur die trockene Gasphase betrachtet.

## 4. Chemometrische Auswertung

Die Simulationsergebnisse zu den untersuchten Parametervariationen (Geometrieparameter siehe Abbildung 3, weiters Variation der mittleren Eintrittsgeschwindigkeit und der Gas-

dichte) wurden zur Ermittlung von Gesamt- und Teildruckdifferenzen ( $p_{12}$  und  $p_{23}$ ) im Zyklonabscheider herangezogen.



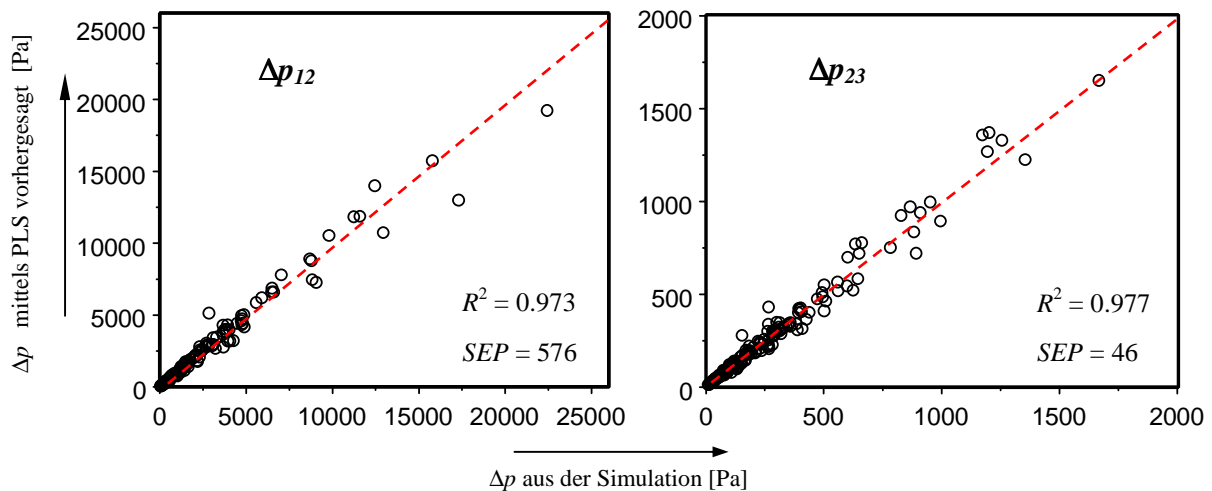
**Abbildung 3: Geometrie des Abscheiders, Geometrieparameter.**

Das Regressionsmodell für die Druckverluste wurde aus (dimensionslosen) Verhältnissen von Geometrieparametern gebildet. In aus der Literatur bekannten empirischen Korrelationen (siehe auch [8]) wird der Druckverlust  $p$  in folgender Form dargestellt:

$$Dp = c_0 \times x_1^{c_1} \times x_2^{c_2} \times \dots$$

Dabei stellen  $x_1, x_2, \dots$  dimensionslose Verhältnisse von Geometrieparametern bzw. daraus abgeleitete, für den Druckverlust charakteristische Größen dar, die Modellparameter sind als  $c_0, c_1, c_2, \dots$  enthalten. Nach logarithmischer Transformation erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen  $\log p$  und  $\log x_1, \log x_2, \dots$ . Die Regressionskoeffizienten wurden mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (partial least squares regression - PLS) ermittelt [8].

Um die Vorhersagekraft der Korrelation bewerten zu können, wurde eine Vergleichsprüfung (cross validation) durchgeführt. Dabei wird der verfügbare Datensatz in Blöcke aufgeteilt; anschließend wird wechselweise jeweils einer der Blöcke aus dem Datensatz herausgenommen und die Regressionsparameter aus dem Rest bestimmt. Die so ermittelte Korrelation wird auf den ausgesparten Block angewendet und die Vorhersagewerte mit den Simulationsdaten verglichen. Auf diese Weise kann eine echte Vorhersage durchgeführt werden, die Korrelation wird am zur Erstellung nicht beteiligten Datensatz geprüft und kann daher aussagekräftig beurteilt werden.



**Abbildung 4: Mittels PLS – Modell ermittelte Vorhersagen des Druckverlustes, aufgetragen gegen Druckverluste aus der Simulation.**

Es konnte ein Modell gefunden werden, das mehr als 75% der vorhergesagten Druckverluste mit einer Abweichung von den Simulationsergebnissen von weniger als 10% liefert, 55% der Vorhersagen liegen sogar unterhalb der 5% - Fehlergrenze.

## 5. Zusammenfassung, Ausblick

Anhand der durchgeführten Simulationen konnte gezeigt werden, dass das Strömungsfeld durch den Einsatz des Leitapparats wesentlich verändert wird. Der Druckverlust wird um 50% vermindert. Mittels Kombination der Simulationsergebnisse mit den Methoden der Chemo-metrik wurde eine leistungsfähige Korrelation zur Vorhersage des Druckverlustes, rein auf geometrischen Parametern und zwei Prozessparametern (Eintrittsgeschwindigkeit, Gasdichte), entwickelt. Dieses Modell erlaubt eine rasche Bestimmung der zu erwartenden Druckdifferenz. Damit dessen Zuverlässigkeit und Anwendbarkeit auf andere Apparategrößen noch weiter verbessert wird, sollten weitere Geometrievarianten implementiert und simuliert werden, um den verfügbaren Datensatz noch weiter zu vergrößern.

Diese Arbeit betrachtet gemäß der Aufgabenstellung nur die trockene Gasströmung von Zentrifugalabscheidern. Es bedarf weiterer Untersuchungen unter Berücksichtigung der dispersen Phase zur speziellen Behandlung des Abscheidegrades. Da sich durch den Einsatz des Leitapparats das Strömungsfeld und somit auch die Verteilung und Intensität auftretender Zentrifugalbeschleunigungen stark verändert, sollte die Forderung nach unveränderter Abscheideleistung durch entsprechende Simulationen überprüft werden.

Die durchgeführten Simulationen wurden stationär gerechnet. Die Strömungsphänomene in Zyklonen sind von instationärer Natur – in weiterführenden Untersuchungen wären demzufolge instationäre Simulationen empfehlenswert. Der Druckverlust könnte anhand dieser Ergebnisse als zeitlicher Mittelwert berechnet und mit jenen aus der stationären Rechnung verglichen werden. Berücksichtigt werden muss dabei jedoch der hohe rechentechnische Aufwand für den (möglichen) zusätzlichen Informationsgewinn.

Mit den Mitteln der CFD können die Tendenzen der Auswirkungen bestimmter Maßnahmen auf die Ausbildung der Strömung festgestellt werden. Es ist aber zu beachten, dass die

Ergebnisse numerischer Simulationen bei komplexen Strömungen nicht immer der realen Strömung entsprechen müssen (Einflüsse durch das Rechengitter, verwendete Modelle für die Turbulenz, Grenzschichten,...). Für eine umfassende Darstellung dieser Problematik sind weitergehende Analysen durchzuführen, vor allem sollten die Resultate der Simulationen zu Strömungs- und Druckfeld mit Messungen an ausgeführten Apparaten validiert werden.

## 6. Literatur

- [1] **Hoffmann, A.C.; Stein, L.E.;** Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation. Springer Verlag (2002).
- [2] **Barth, W.;** Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen. Brennstoff – Wärme – Kraft 1 (1956) 1-9.
- [3] **Shepherd, C.B.; Lapple, C.E.;** Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors (1). Industrial and Engineering Chemistry 8 (1939) 972-984.
- [4] **Maier, C.;** Optimierung von Drallabscheidern mittels Strömungssimulation. Diplomarbeit, Technische Universität Wien (2005).
- [5] **Zentraler Informatikdienst (Hrsg.):** Applikationsserver Compaq SC45.  
<http://www.zserv.tuwien.ac.at/sc/> (2005.12.12).
- [6] **FLUENT Inc. (Hrsg.):** Fluent 6.2 User's Guide (2005).
- [7] **FLUENT Inc. (Hrsg.):** Gambit 2.1 User's Guide (2001).
- [8] **Maier, C.; Jordan, C.; Harasek, M.; Varmuza, K.;** Predicting the pressure drop of cyclones by combined application of computational fluid dynamics and chemometric methods. Poster Presentation at Conferentia Chemometrica 2005 - Chemometrics VII, 2005-08-28 to 08-31 (2005).
- [9] **Gimbun, J.; Chuah, T.G.; Fakhru'l-Razi, A.; Choong, T.S.Y.;** The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. Chemical Engineering and Processing 44 (2005) 7-12.