

Abschlußbericht

zum durch die Max-Buchner Forschungsstiftung geförderten
Forschungsvorhaben

Verwendung zweiphasiger Turbulenzmodelle zur Modellierung des Strömungsverhaltens von Partikelstäuben

Dr.-Ing. Stephan Gerber
Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik
Fakultät III
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung

Ernst-Reuter-Platz 1, 10 587 Berlin
Tel.: +49 30 314 26321
Fax: +49 30 314 26432
Email: Stephan.Gerber@tu-berlin.de

Berlin September 2018

1 Einleitung

Im Zusammenhang mit der Verwendung von Stäuben entstehen bis heute weltweit zahlreiche Unfälle. Dabei werden Menschen getötet und enorme Sachwerte vernichtet (siehe z.B. [1]). Im wissenschaftlichen Fokus steht dieses Thema daher bereits seit vielen Jahrzehnten und hat durch den Einsatz moderner Methoden wie der Computational Fluid Dynamics (CFD) nochmals einen enormen Schub bekommen. CFD-Methoden erlauben es grundsätzlich fallbezogen quantitative Aussagen zu treffen und damit die bekannten empirisch-heuristischen Methoden zu ergänzen. Der in diesem Projekt eingeschlagene Weg der Verwendung von Euler-Lagrange-Methoden zur Modellierung liegt nach den Ergebnissen von [2] auf der Hand, ist jedoch für die Berechnung von realitätsnahen Fragestellungen enorm rechenaufwändig. Daher wird in diesem Projekt die durch die Betrachtungen in [2] empfehlenswerte Modellierung durch Euler-Lagrange-Methoden am Beispiel einer der Standardapparaturen zur Beurteilung der Staubexplosionsfähigkeit untersucht: der 20 Liter Kugel nach DIN EN 14034 (siehe [3–6]). Ziel dieses Projektes ist dabei im Speziellen die Untersuchung des Strömungsverhaltens von Stäuben innerhalb dieser Apparatur unter besonderer Berücksichtigung der Turbulenz.

2 Physikalische Einordnung / Vorgehen im Experiment

Abbildung 1 zeigt die Geometrie der 20 Liter Kugel. Während des Versuches wird ein Teil der Apparatur auf einen Druck von 20 bar gebracht während die eigentliche Versuchapparatur (die 20 Liter Kugel selbst) auf einen Druck von 0.4 bar gebracht wird (siehe Abbildung 2, welche die zur Löserentwicklung betrachtete Ersatzgeometrie zeigt). Im Hochdruckteil wird zudem der zu untersuchende Staub eingebracht (siehe Abbildung 3). Typischer Weise werden dabei Staubfraktionen mit einem Partikeldurchmesser kleiner als $63\ \mu\text{m}$ untersucht, um eine möglichst reaktive Situation zu provozieren und damit den worst-case abzubilden. Zu Beginn des Experimentes wird dann das Ventil, welches die beiden Anlagenteile mit unterschiedlichen Drücken trennt, geöffnet. Durch die Öff-

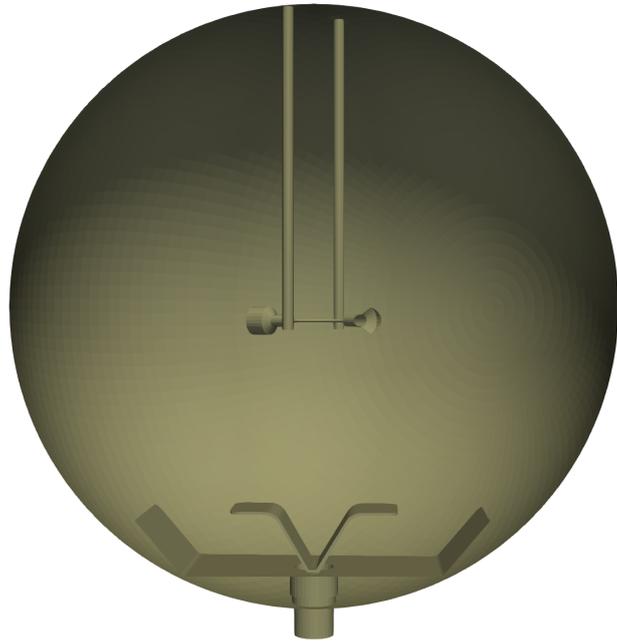


Abbildung 1: 20 Liter Kugelapparatur, Schnitt des numerischen Gitters)

nung des Ventiles wird zum einen ein Verdichtungsstoß und zum anderen eine Expansionswelle ausgelöst. Beide Phänomene führen letztendlich zu einer druckausgeglichenen Apparatur zum Ende des Experimentes. Die eigentliche Zündung des entstehenden Staub-Luft-Gemisches wird nach 60 ms realisiert. In der vorliegenden Arbeit ist der Zündungszeitpunkt das Ende der Simulation, da nur die Betrachtung des Einströmvorganges mit den damit verbundenen turbulenten Phänomenen hier von Interesse sein soll. Bei dem vorliegenden Problem handelt es sich folglich um eine kompressible Partikelströmung, die initial im subsonischen, später im supersonischen Bereich liegt. Weitere Betrachtungen (insb. nach der Zündung) werden eine Implementation reaktiver Simulationsbestandteile sowohl in der Gasphase als auch in der Partikelphase notwendig werden lassen.

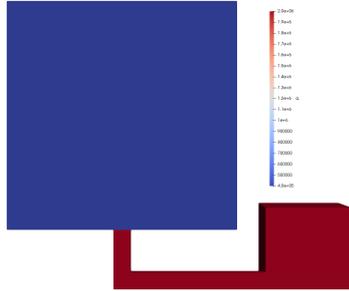


Abbildung 2: Ersatzmodell der 20 Liter Kugelapparatur, links Niederdruckteil

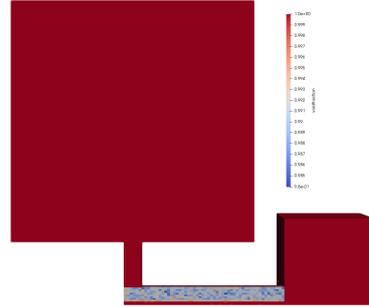


Abbildung 3: Ersatzmodell der 20 Liter Kugelapparatur mit initialen Partikelpositionen

3 Bilanzgleichungen

Aus mathematischer Sicht muss für das Projekt die folgende Massenbilanz gelöst werden

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \mathbf{u}_g) = 0, \quad (1)$$

wobei ε , ρ_g , and \mathbf{u}_g für den Volumenanteil der Gasphase, die Gasdichte und die Geschwindigkeit der Gasphase stehen.

Zudem wird die folgende vektorielle Bilanz für den Impuls gelöst

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_g \mathbf{u}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) + \varepsilon \nabla p + (\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}) + \varepsilon \rho_g \mathbf{g} = \mathbf{F}_s. \quad (2)$$

Dabei stehen p , $\boldsymbol{\tau}$ und \mathbf{g} als Bezeichner für den Druck, den Spannungstensor und die Gravitationskraft. \mathbf{F}_s bezeichnet den Impulstransport zwischen der festen und gasförmigen Phase. Geschlossen wird dieses Gleichungssystem durch die ideale Gasgleichung, welche Druck, Dichte und Temperatur miteinander koppelt und einer Energiegleichung (hier nicht gezeigt).

Die Partikelphase wird durch folgendes Differentialgleichungssystem für den Ort \mathbf{x}_p , die Geschwindigkeit \mathbf{u}_p und die Rotationsgeschwindigkeit $\boldsymbol{\omega}_p$ eines Partikels

beschrieben

$$\begin{aligned}
 \frac{d\mathbf{x}_p}{dt} &= \mathbf{u}_p, \\
 \frac{dm_p\mathbf{u}_p}{dt} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i, \\
 \frac{dI_p\boldsymbol{\omega}_p}{dt} &= \sum_{i=1}^m \mathbf{T}_i.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Dabei steht m_p für die Masse, I_p für das Massenträgheitsmoment sowie \mathbf{F}_i und \mathbf{T}_i für die am Partikel angreifenden Kräfte und Momente.

4 Realisierung der Simulation / erste Ergebnisse

Zur Lösung des vorliegenden Problems wurden die Simulationstools OpenFOAM (siehe [7]), CFDEM (siehe [8]) und LIGGGHTS (siehe [9]) verwendet und entsprechend modifiziert. Aus OpenFOAM wurde dabei ein geeigneter einphasiger, kompressibler Löser verwendet und getestet, um das einphasige Strömungsproblem zu lösen. Dabei konnten sowohl Expansionswellen als auch Verdichtungsstöße simuliert werden. Eine Auflösung des Verdichtungsstoßes findet dabei nur auf Basis des gewählten numerischen Gitters statt und nicht auf Basis einer irgendwie gearteten Frontverfolgung. Dieser Löser wurde in einem zweiten Schritt mit den Kopplungsroutinen aus CFDEM verbunden, um eine vollständige Kopplung (sogenannte Vier-Wege-Kopplung) der Gasphase mit der Partikelphase zu erreichen.

Die Abbildungen 4(a) und 4(b) sowie 5(a) und 5(b) zeigen die Situation in der Ersatzgeometrie zu Beginn und während der Simulation. Die Partikel wurde dabei als Kugel und Pfeile dargestellt, wobei die Kugel entsprechend des Partikeldurchmessers gezeigt werden (hier $125 \mu\text{m}$) und die Pfeile entsprechend der Partikelgeschwindigkeiten (hier max. einige Hundert m/s). Die hohen Partikelgeschwindigkeiten und kleinen Partikeldurchmesser sowie die Verwendung von DEM-typischen Feder-Dämpfersystemen zur Modellierung der Partikelkollisionen erfordern sehr kleine Zeitschritte im Bereich von 1 ns. Zu Beginn der Simulation folgen die Partikel der Fluidströmung in den größeren Niederdruckbereich

hinein (siehe Abbildung 4(a)) und treffen dann auf die obere Begrenzung des Niederdruckteiles der Geometrie (siehe Abbildung 4(b)). Während der Simulation zeigen die Partikel im Niederdruckteil der Geometrie eine ausgeprägten Wirbel, der im zentralen Bereich weiterhin nach oben zeigt und an den Geometriewänden nach unten (siehe Abbildung 5(a)). Die Partikel sind bereits während der Simulation mehr oder weniger gleich verteilt (siehe Abbildung 5(b)) und zum Ende der Simulationszeit annähernd homogen verteilt (nicht gezeigt).

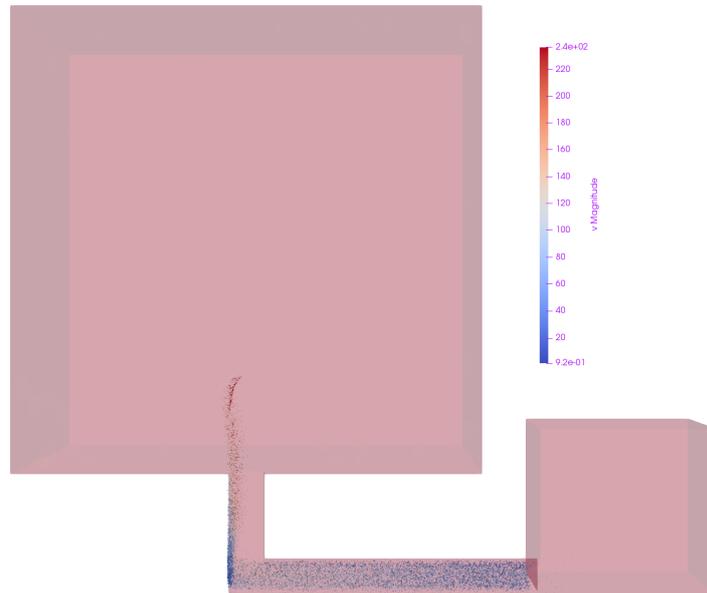
5 Nächste Schritte

In den nächsten Schritten soll der entwickelte Löser auf einem größeren Rechencluster genutzt werden, um den Einströmvorgang zu berechnen. Dabei werden dann Partikel mit kleineren Durchmessers ($\leq 63 \mu\text{m}$) und realistischen Partikeldurchmesserverteilungen untersucht. Insbesondere der Übergang zur echten Kugelgeometrie (siehe Abbildung 1) und die Verwendung von realistischen Partikelanzahlen ($\geq 10^6$ Partikel) und Partikelverteilungen werden den Rechenaufwand nochmals erheblich steigern. Dies liegt zum einen an der deutlich gestiegenen Zellanzahl für das numerische Gitter im Vergleich zu der Geometrie, die für die Entwicklung des Löser verwendet wurde, der Polydispersität der Partikeldurchmesserverteilungen mit entsprechend aufwändigeren Kollisionsberechnungen (insbesondere die Suche nach Kollisionspartnern) und den kleineren Zeitschritten aufgrund der verringerten Partikeldurchmesser.

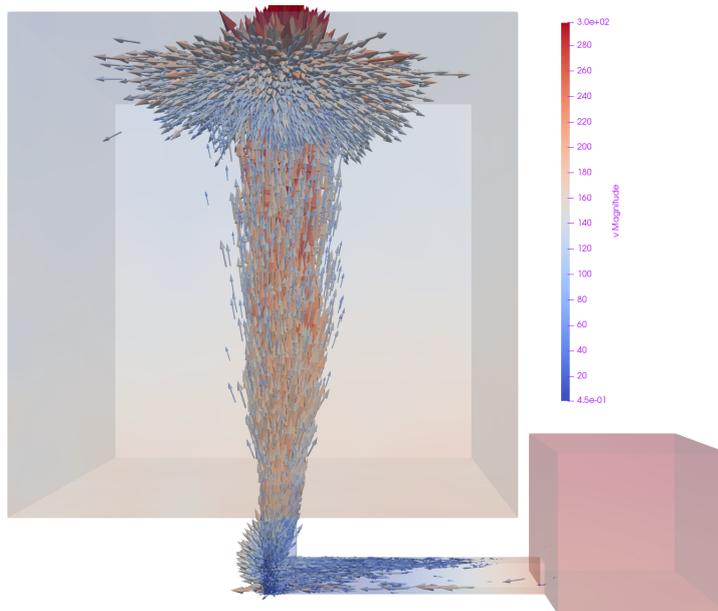
Um das angestrebte Ziel der Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf den Einströmvorgang abbilden zu können, soll der Einfluss verschiedener Beschreibungen des Spannungstensors $\boldsymbol{\tau}$ sowie der Einfluss eines durch verschiedene Dispersionsmodelle beschriebenen Schwankungsanteiles des Partikelgeschwindigkeit \boldsymbol{u}_p untersucht werden.

6 Danksagung

Ich danke der Max-Buchner Forschungsstiftung für die Unterstützung dieses Projektes, ohne welche dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre.

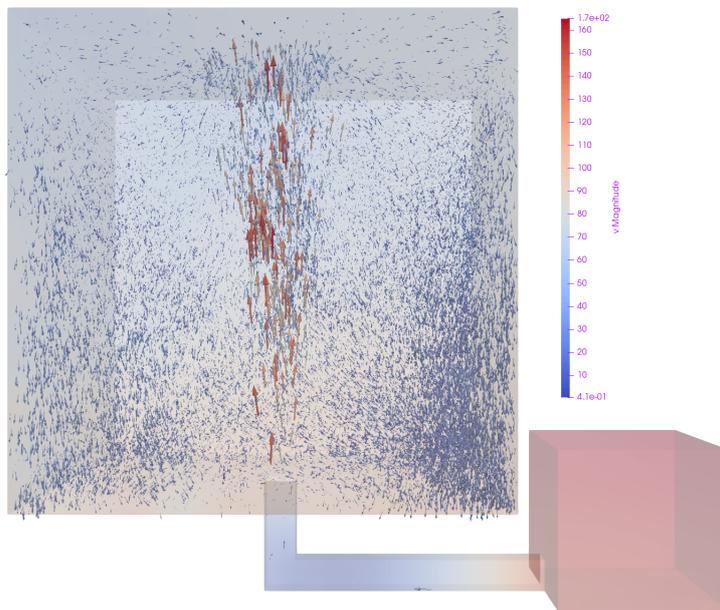


(a) Einströmvorganges nach 0.5 ms

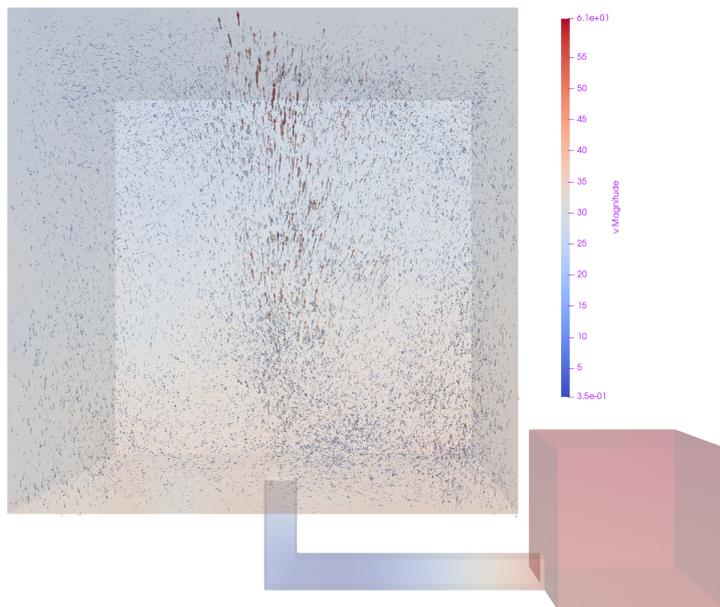


(b) Einströmvorganges nach 0.25 ms

Abbildung 4: Snapshots des Einströmvorganges zu Beginn der Simulation (Pfeil-
farbe entspricht Partikelgeschwindigkeit in m/s)



(a) Snapshot des Einströmvorganges nach 15 ms



(b) Snapshot des Einströmvorganges nach 20 ms

Abbildung 5: Snapshots des Einströmvorganges während der Simulation (Pfeilfarbe entspricht Partikelgeschwindigkeit in m/s)

Literatur

- [1] Paul Amyotte. *An Introduction to Dust Explosions*. Butterworth-Heinemann, Boston, 2013.
- [2] S. Balachandar and J. Eaton. Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:111–133, 2010.
- [3] Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes p_{max} Staub/Luft-Gemischen, April 2011.
- [4] Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $(dp/dt)_{max}$ von Staub/Luft-Gemischen, April 2011.
- [5] Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen, April 2011.
- [6] Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 4: Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration SGK von Staub/Luft-Gemischen, April 2011.
- [7] OpenFOAM | Free CFD Software | The OpenFOAM Foundation, September 2016. <http://openfoam.org/>.
- [8] About CFDEM®project | CFDEM®project, September 2016. <http://www.cfdem.com/>.
- [9] LIGGGHTS®Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code | CFDEM®project, September 2016. <http://www.cfdem.com/liggghtsr-open-source-discrete-element-method-particle-simulation-code>.