



3dParFlow – Untersuchungen
und Validierung eines neuartigen
numerischen Rechenverfahrens
zur 3d-Modellierung
diskreter Partikel in einer Strömung

Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen
Carla Schneefeld, M. Eng.
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Das Ziel des Projekts ist es, Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Modellierung von bewegten Festkörpern, wie beispielsweise Sedimente und Geschiebe in einer Strömung mittels 3d-CFD-Methoden zu sammeln und für wasserbauliche, hydraulische Untersuchungen einzusetzen. Fachspezifische Softwarepakete liefern Lösungen und entsprechende numerische Ansätze. Die Überprüfung der physikalischen Plausibilität und die Einhaltung natürlicher Gesetzmäßigkeiten sind allerdings die Voraussetzung, um ein numerisches Modell in der Praxis anwenden zu können. Im Zuge dieser Arbeiten werden ausgewählte Lösungsansätze auf der Grundlage eines bestehenden, gegenständlichen Versuchsstandes untersucht. Das dadurch erzeugte kalibrierte Modell bietet mittelfristig beispielsweise die Möglichkeit zur Entwicklung von Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung von Wasserbausteinen, welche in Spezialfällen zur Füllung von Energieumwandlungsanlagen / Tosbecken an Hochwasserentlastungen verwendet werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Bauingenieurwesen / Labor für Wasserbau
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen
Kontaktdaten	E-Mail: dirk.carstensen@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Durch die über die letzten Jahre steigende Rechnerleistung sowie stetige Neuerungen und Verbesserungen numerischer Methoden und CFD-Softwareanwendungen eröffnen sich neue Anwendungsfelder für Strömungssimulationen im Bereich des Wasserbaus.

Die Standardprozedur der numerischen Modellierung von Sedimenten und Geschiebe in Fließgewässern ist ein empirischer Ansatz. Anstatt die Bewegung jedes einzelnen Partikels zu modellieren, wird das Sediment in seiner Gesamtheit als Volumenanteil berechnet. Dies geschieht über Ansätze wie beispielsweise die Formel für Geschiebetransport von Meyer-Peter und Müller (Aigner & Carstensen, 2015). Die Methodik ermöglicht die großflächige Betrachtung von Sedimentbewegungen ganzer Flussgebiete, sie ist für lokale Detailuntersuchungen aber in der Regel nicht gut geeignet.

3d-CFD-Software liefert mittlerweile auch Methoden zur diskreten Modellierung einzelner Feststoffkörper in einer Strömung. Das kann beispielsweise dazu dienen, Sedimentbewegung im Nahfeld von Wasserbauwerken besser zu verstehen und derartige Effekte in Planung und Instandhaltung von Bauwerken berücksichtigen zu können. Vor allem bei komplexen und turbulenten Strömungsverhältnissen lassen sich aus der Anwendung empirischer Ansätze oftmals keine ausreichenden Erkenntnisse ableiten.

Modellversuche zur Überprüfung der Funktionalität von Hochwasserentlastungsanlagen mit einer neuartigen, umweltverträglichen Gestaltung der Energieumwandlungsanlagen (Tosbecken) im Labor für Wasserbau Nürnberg gaben den Anlass, die Modellierbarkeit von Feststoffkörpern in turbulenten Strömungsverhältnissen durch die bereits genannten Methoden genauer zu untersuchen. Das Ziel ist es, die Tosbecken durch eine Verfüllung mit Gesteinsmaterial besser in den Gewässerlauf zu integrieren. Die Voraussetzung hierfür ist, dass im seltenen, Fall eines entsprechenden Hochwasserereignisses das Füllmaterial durch die Kraft der turbulenten, schießenden Strömung aus dem Becken geräumt wird. Dieses wird anschließend seiner eigentlichen Funktion als Energieumwandler gerecht. Um das sicherzustellen, ist eine entsprechende Dimensionierung des Füllmaterials notwendig. Allerdings fehlen hierzu bisher Bemessungsrichtlinien und Empfehlungen. Die dreidimensionale, hydrodynamisch numerische (3D HN) Modellierung kann hierzu Grundlagen schaffen.

Ein bestehender, gegenständlicher Modellversuch – Standardüberfall mit anschließendem, mit gleichförmigen Kugeln ausgelegtem Tosbecken – diente als Basis der Untersuchungen. Der Versuch zeigte im Verlauf von Voruntersuchungen, dass die Simulation der Kugelbewegungen bei entsprechenden Randbedingungen möglich ist. Allerdings ließ er noch deutliche Defizite in der bestehenden Modellierung erkennen, die sich durch ein teilweise physikalisch nicht plausibles Verhalten der Kugeln zeigte. Als Ursachen werden ungenaue Randbedingungen, falsch gewählte Programmeinstellungen, Gittereffekte und ggf. Grenzen der Methodik angenommen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ein wesentliches Ziel des Forschungsprojekts ist die Untersuchung und Anwendung numerischer Methoden zur Modellierung der Festkörperbewegung, um diese für wasserbauliche, hydraulische Untersuchungen einsetzen zu können. Das bestehende 3d-CFD-Modell soll weiterentwickelt und kalibriert werden, um eine maximal mögliche Übereinstimmung mit natürlichen Vorgängen zu entwickeln. Auf dieser Grundlage ist es möglich zu bewerten, ob numerische Methoden nach dem heutigen Stand in diesem speziellen Anwendungsbereich in der Lage sind, die Natur und die Physik abzubilden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche Untersuchungen zu Modellierung von Festkörpern in Strömungen durchgeführt. Gearbeitet wurde mit der CFD-Software Star-CCM+.

Anhand der Versuche wurden Möglichkeiten der Software untersucht, diskrete Partikel in Strömungen zu simulieren und diese entsprechend auch auf ihre Plausibilität und Nähe zu natürlichen Gesetzmäßigkeiten hin zu überprüfen. Folgende Szenarien wurden untersucht:

- Sedimentbewegung von Sand in einer Strömung über eine raue Sohle (nur numerisch)
- nicht-sphärische Körper in einer Strömung (nur numerisch)
- einzelne Kugel in einer Strömung (physikalischer Referenzversuch und numerische Modellierung)

Zwei von drei Modellen wurden mit gleichförmigen Kugeln als diskrete Körper aufgesetzt. Die Kugel als einfachste Form wird für die Grundlagenstudien herangezogen, da sie eine einfachere Validierung der Simulation ermöglicht und dadurch geometriebedingte Effekte nicht berücksichtigt werden müssen. Mit einem plausiblen „einfachen“

chen“ Modell könnte in einer nächsten Stufe mit einer Übertragung auf komplexere Szenarien begonnen werden. Dazu gehören beispielsweise nicht-sphärische Körper, bei denen bei einer Interaktion miteinander beispielsweise auch Verklammerungseffekten entstehen können.

Für die 3d-Modellierung ist die Auswahl geeigneter numerischer Methoden und Lösungsansätze essentiell. Soll die Lage der freien Oberfläche abgebildet werden, umfasst das Modellgebiet bei wasserbaulichen Anwendungsfällen oft einen Wasser- und einen Luftbereich. Durch Strömungshindernisse oder Strömungsbedingungen kommt es meist zu Turbulenzerscheinungen, die, je nach Ausprägung, einen maßgebenden Einfluss auf die Strömung haben. Dies muss in der Auswahl der numerischen Methoden für die Simulationen berücksichtigt werden. Für die Simulationen wurde mit folgenden Methoden gearbeitet:

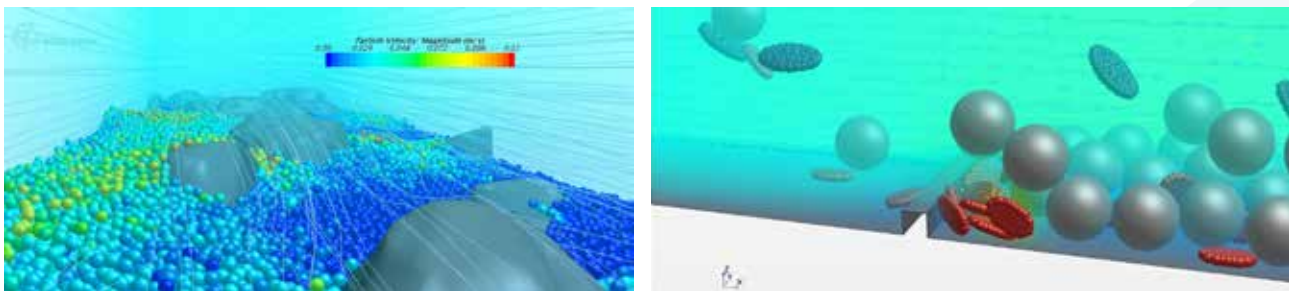
Als Modell für die Simulation von Mehrphasenströmungen (Wasser und Luft) wurde die Eulerian Multiphase gewählt, die zur Abbildung der Phasengrenzschicht (Wasseroberfläche) durch die Volume of Fluid (VOF)-Methode ergänzt wird. Als Turbulenzmodell wurde das Spalart-Allmaras Detached Eddy Modell verwendet, das als Kombination aus LES (Large-Eddy-Simulation) und RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) Modellen eine Auflösung von größeren Wirbelstrukturen innerhalb des Modellgebiets gewährleistet (LES). Durch den Einsatz von RANS (keine direkte Modellierung von Wirbeln, Mittelung der Strömungsgrößen und Verwendung einer turbulenten Scheinreibung (Wirbelviskosität) zur Beschreibung der Turbulenzauswirkungen in den Randbereichen ist es möglich, signifikant Rechenzeit gegenüber einem reinen LES Modell einzusparen.

Zur diskreten Modellierung der Partikel wurde die Discrete-Element-Method (DEM) eingesetzt. Diese basiert auf dem Lagrange'schen Ansatz, bei dem einzelne Partikel bei ihrer Bewegung durch ein Kontinuum verfolgt werden, wohingegen bei dem Euler'schen Ansatz Parameter der vorbeiziehenden Strömung an fixen Punkten berechnet werden. DEM ermöglicht die Modellierung nicht-deformierbarer Partikel nahezu aller Formen mit verschiedenen Materialeigenschaften. Dabei werden nicht nur die Einwirkungen der Trägerphase auf die modellierten Partikel, sondern auch die Kontakte zwischen den Teilchen untereinander berücksichtigt, was vor allem für Strömungen mit einer hohen Partikeldichte maßgebend ist. Hier müssen im Multiphase Interaction Modell verschiedene Kontakteinstellungen vorgenommen werden, die maßgebenden Einfluss auf die Simulation haben.

Die Grafiken auf der folgenden Seite zeigen die Simulation von Sedimentbewegung in einer Strömung über eine raue Sohle (links) und die Modellierung sphärischer und nicht-sphärischer Körper in einer Strömung.

Für die Sedimentmodellierung wurde ein Modellgebiet mit der Sohlstruktur einer rauen Kiessohle (150 x 10 cm) erstellt. Im Nahbereich der Sohle, auf dem sich auch die Sandkörner bewegen sollen, wurde die Gitterweite auf bis zu 3,75 mm Zellgröße verfeinert, zudem wurden über der Sohle dünne Zellschichten eingefügt, da die Fließgeschwindigkeit hier gegen null geht. Die Sohle wurde mit Sandpartikeln mit einem Durchmesser von $d = 1,5$ mm und einer Dichte von $\delta = 2650$ kg/m³ bedeckt. Die Partikel wurden über eine Injektions-Ebene wenige Zentimeter über der Sohle in das Modellgebiet eingespeist und konnten sich bei stehendem Wasserkörper absetzen. Bei anschließender Durchströmung des Modellgebiets bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von $v_m = 0,28$ m/s kam es zu einer Bewegung der oberen Partikel. In der nachfolgenden Abbildung (linkes Bild) ist die Geschwindigkeit der Körner in der Simulation farblich dargestellt. Hier ist erkennbar, dass sich die Partikel in exponierter Lage und in Bereichen höherer Fließgeschwindigkeit mit der Strömung bewegen, während in der Mulde auf der rech-

ten Bildhälfte kaum eine Bewegung der Körner stattfindet, weil die Geschwindigkeit des Wassers durch den vorangehenden Strömungsschatten der Steine geringer ist und die kritische Sohlschubspannung somit nicht überschritten wird. Als Plausibilitätsprüfungen wurden neben visueller Beurteilung auch analytische Berechnungen durchgeführt. Nach dem Ansatz von Peter-Meyer-Müller ((1949), aus (Patt & Gonsowski, 2011)) wurden mit der angesetzten, mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,28 m/s die vorhandene Sohlschubspannung und die Grenzschubspannung ermittelt. Erstere liegt wie erwartet über dem kritischen Grenzwert, wonach es per Definition zu einem Transportbeginn des Feststoffs kommt. Nach dem Ansatz von Shields wurden in einem weiteren Schritt die Froude- und Reynoldszahl der Körnung (Fr^* und Re^*) berechnet und damit die Feststoffbewegung über das modifizierte Shields-Diagramm (nach SHIELDS (1936), aus (Aigner & Carstensen, 2015)) ebenfalls bestätigt. Ein gegenständlicher Modellversuch zu beschriebenen Modellversuch steht noch aus.



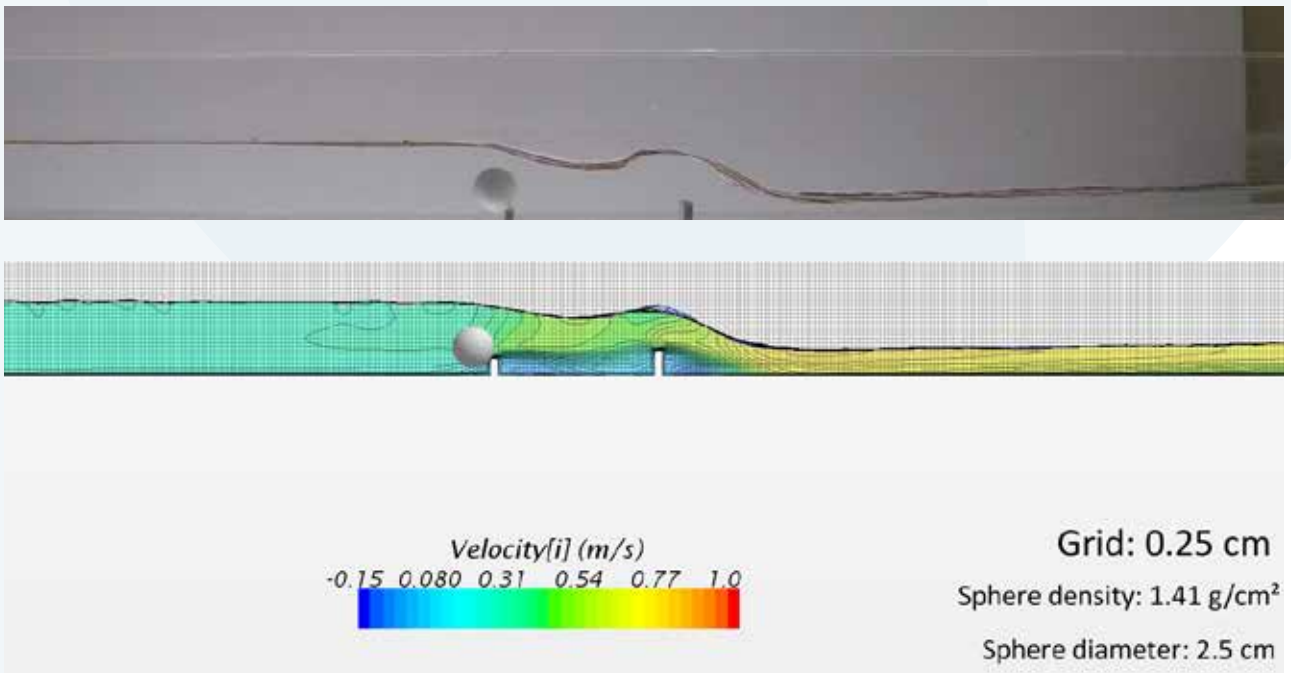
Modellierung von Sandbewegung in einer Strömung über eine raue Sohle (links) und Modellierung von Körpern unterschiedlicher Form (rechts).

Anhand einer zweiten Simulation wurden erste Versuche mit nicht-sphärischen DEM-Partikeln durchgeführt (vgl. vorangegangene Abbildung, rechts). Hierzu bietet die Software in der verwendeten (zum Zeitpunkt der Versuche aktuellsten) Version 10.6 zwei Möglichkeiten: Particle Clumps und Composite Particles. Bei beiden Varianten wird eine beliebige Form durch das zusammensetzen kleinerer, sphärischer Teilchen erzeugt. Bei Particle Clumps handelt es sich um deformierbare Partikel, deren interne Verbindungen aufgrund von Zug- oder Schubspannung brechen können und bei welchen die Kräfte zwischen Fluid und Partikel für jede einzelne Sphäre berechnet werden. Das Model Composite Particles dagegen beschreibt steife Partikel, an denen Lift-, Schlepp- und Rotationskräfte auf den Massenschwerpunkt des Partikels wirken und dieser sich wie ein einzelner Partikel mit komplexer Form verhält. In der Simulation mit sphärischen Körpern, Particle Clumps und Composite Particles kam es beim Auftreffen auf eine Wand oder beim Zusammenstoß mit anderen Teilchen zu einem unkontrollierbaren Brechen der Particle Clumps. Demnach kommt für eine Anwendung des DEM-Modells im Bereich Festkörperbewegung, wie beispielsweise eine Untersuchung der Ausräumung gefüllter Tosbecken, nur das Model Composite Particles in Frage, da ein Brechen der Partikel nicht erwünscht ist. Da für jeden nicht-sphärischen Partikel eine größere Anzahl an kleineren Sphären modelliert werden muss, steigt der Berechnungsaufwand für diese Art von Modell nochmals enorm an, was eine praktische Anwendung erschwert.

In einer dritten Versuchsreihe wird die Plausibilität der modellierten Kugelbewegung anhand eines einfachen Versuchs mit einer einzelnen Kugel (Durchmesser = 2,5 cm; Dichte = 1,41 g/cm³) in einer kleinen Versuchsrinne (Breite 4 cm) überprüft. Bei einer solchen Hybriden Modellierung werden ein physikalischer und ein numerischer Modellversuch kombiniert, um eine Referenz für die Numerik zu haben sowie auch, um ergänzende Informatio-

nen zu Strömungsparametern aus dem numerischen Modell herauslesen zu können. Der gegenständliche Versuch soll in diesem Fall zur Kalibrierung des numerischen Modells durch Auswahl und Festlegung geeigneter Modelleinstellungen dienen. Die beiden Abbildungen auf der folgenden Seite zeigen den durchgeführten Versuch im physikalischen und im numerischen Modell.

Die Versuchsrinne wurde mit zwei kleinen Sohlschwellen (1,0 und 1,5 cm Höhe) bestückt, um das Verhalten der Kugel, beim Auftreffen auf ein Hindernis, in beiden Modellen (physikalisch und numerisch) vergleichen zu können. Die Kugel wurde aus definierter Position am Beginn der Rinne in die Strömung (0,44 l/s) fallen gelassen und anschließend vom Wasser durch die Rinne transportiert. 13 Versuche wurden mittels Video dokumentiert und ausgewertet. Der Weg der Kugel aus dem gegenständlichen Modellversuch wurde mit dem der Simulation verglichen (Position / Zeitpunkt). Diese wurden u.a. mit den zuvor aufgeführten Modelleinstellungen und verschiedenen Gitterweiten/ -arten aufgesetzt. Die Gitterstudie bestätigte die Annahme, dass die Bewegung der Kugel stark von Gitterparametern (Zellweite und Form) abhängig ist. Bei einem feineren Gitter bei sonst gleichbleibenden Parametern wird eine wesentlich schnellere Kugelbewegung festgestellt. Die Gitterweite wurde auf 0,25 cm im Wasserbereich und 0,125 cm im Bereich der Schwellen festgelegt, um mit diesen gleichbleibenden Einstellungen weitere Modellparameter der Methode Multiphase Interaction zu untersuchen. Diese legt fest, wie sich die Kugeln bei Kontakt mit einer anderen Kugel bzw. mit festen Randflächen verhalten. Modifiziert wurden die Parameter Model (Kontaktmodel, Ansatz nach Hertz-Mindlin oder Linear Spring), Static Friction (Haftreibung) sowie Normal und Tangential Restitution coefficient (Stoßzahl normal und tangential zur Aufprallfläche). Es wurden bislang 22 Simulationen durchgeführt, ausgewertet und dokumentiert. Die Untersuchungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen, die Kalibrierung des Modells läuft noch.



Gegenständlicher (erstes Bild) und numerischer Modellversuch (zweites Bild) mit einzelner Kugel in einer Strömung zur Kalibrierung des numerischen Modells. Modellgitter hier mit einer Gitterweite von 0,25 cm und Layer an der Sohle aber ohne zusätzliche Verfeinerungsbe-reiche.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Durch einen vorangegangenen Auslandsaufenthalt von Carla Schneefeld M. Eng. (wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nürnberg) und vor Ort durchgeführter Arbeiten und Diskussionen zum Thema, steht das IWWN weiterhin in Kontakt mit Nils Rüther (Associate Professor). Das ermöglicht einen fachlichen Austausch mit der Technischen Universität Trondheim, Norwegen.

Durch das erarbeitete Wissen im Zuge dieses Projekts konnte ein kooperativer Antrag auf Forschungsförderung beim Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit mit fünf kooperierenden, bundesweiten Einrichtungen zum Thema „Haushebung in Überschwemmungsgebieten am Beispiel des Elbe-Dorfes Brockwitz“ gestellt werden, für welchen die Antragsteller im März 2017 den Zuschlag für eine Gesamtfördersumme von knapp 200.000 € erhielten. Weitergehend konnte im August 2017 die Arbeit an einem Projekt zur Wasseraufteilung und Sedimentbewegung am Oberen Wöhrder See in Nürnberg (Wasserwirtschaftsamt Nürnberg) aufgenommen werden.

Der derzeitige Wissensstand zur Thematik der diskreten Partikelmodellierung bietet die Grundlage, weitergehend auch einen Forschungsantrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG o. a. Förderern zu stellen. Die weiterführende Untersuchung der Thematik wird als zukunftssträftig eingestuft, da durch physikalisch richtige Modelle eine deutliche Erleichterung in der Bearbeitung entsprechender, wasserbaulicher Fragestellungen gegeben wäre.

6. Literatur

Aigner, D., & Carstensen, D. (2015). Technische Hydromechanik 2. Berlin: Beuth Verlag.

Patt, H., & Gonsowski, P. (2011). Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. Springer.