

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schulze, Lydia; Thorenz, Carsten

Mehrphasenmodellierung im Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102274>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schulze, Lydia; Thorenz, Carsten (2015): Mehrphasenmodellierung im Wasserbau. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauwerke - Vom hydraulischen Entwurf bis zum Betrieb. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 53-58.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Mehrphasenmodellierung im Wasserbau

Lydia Schulze M.Eng., Bundesanstalt für Wasserbau
Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Durch wachsende Computerressourcen und die stetige Weiterentwicklung der Methoden steigt der Einsatz der numerischen Simulation bei der Bearbeitung von verschiedensten Fragestellungen. Auch im Wasserbau werden numerische Modelle zunehmend eingesetzt, um komplexe strömungsdynamische Untersuchungen durchzuführen. Im Nahbereich von Wasserbauwerken können mit Hilfe von numerischen Strömungsberechnungen Aussagen z. B. zu Wasserständen, Geschwindigkeiten und Drücken getroffen werden. Da jedoch häufig auch die Interaktion zwischen Wasser und Luft einen Einfluss auf die Strömung hat, muss auf Methoden der Mehrphasenmodellierung zurückgegriffen werden. Abhängig von der Erscheinungsform der Strömung wird dazu eine Klassifizierung durchgeführt und ein passender Modellierungsansatz gewählt.

Klassifizierung von Mehrphasenströmungen

Als Phase einer Mehrphasenströmung wird eine definierte Materialklasse bezeichnet, die in sich homogene Eigenschaften vorweist. Auch verschiedene Aggregatzustände eines Fluids können als verschiedene Phasen betrachtet werden. Für die numerische Modellierung können Mehrphasenströmungen nach dem Aggregatzustand der an der Strömung beteiligten Phasen und nach der Topologie der Grenzfläche zwischen den Phasen klassifiziert werden (Ishii 1975). Im Fall von Zweiphasenströmungen unterscheidet man mit dem erstgenannten Kriterium zwischen Gas-Feststoff-Strömungen, Gas-Flüssigkeitsströmungen, Flüssigkeits-Feststoff-Strömungen und Flüssigkeit-Flüssigkeits-Strömungen. Wenn eine gasförmige Phase vorhanden ist, kann abhängig von der vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeit und der Schallgeschwindigkeit des Fluids die Strömung zusätzlich als kompressibel oder inkompressibel beschrieben werden. Betrachtet man andererseits die Grenzflächentopologie, kann zwischen dispersen und separierten Strömungen differenziert werden. Bei separierten Strömungen treten die Phasen unvermischt auf und teilen eine kontinuierliche Grenzfläche an der die Phasen die gleiche Geschwindigkeit haben. Disperse Strömungen bestehen aus einer kontinuierlichen Phase und einer dispersen Phase. Die Phasen durchdringen einander und die Grenzfläche zwischen den Phasen ist nicht durchgängig. Hier können Relativgeschwindigkeiten zwischen den Phasen auftreten. Zudem hat der Impulsaustausch in einigen dispersen Strömungen einen Einfluss, der nicht zu vernachlässigen ist. Im Folgenden wird die Modellierung von Luft-Wasser-Strömungen näher betrachtet, da diese im Wasserbau von großer Bedeutung sind. Für die meisten Anwendungsfälle kann die Kompressibilität der Luft vernachlässigt werden, da diese erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten oder Druckunterschieden maßgeblich wird. Derartige Strömungen werden dann als inkompressible Gas-Flüssigkeitsströmungen modelliert. In der Praxis wird oft von separierten Luft-Wasser-Strömungen ausgegangen. Dies ist

hinreichend, wenn keine starke Durchmischung wie z.B. bei einem Wechselsprung hinter einem Wehrüberfall auftritt.

Modellierung von Luft-Wasser-Strömungen

Für die Modellierung muss zunächst geklärt werden, welche physikalischen Phänomene die Strömung maßgeblich beeinflussen und dementsprechend abgebildet werden müssen. Insbesondere ist zu definieren, welche Größen- und Zeitskalen im Modell abgebildet werden sollen. Außerdem muss festgelegt werden, ob die direkte Abbildung der Phasengrenze relevant ist und ob der Impulsaustausch zwischen den Phasen Einfluss auf die Strömung hat. Bei der Modellierung von Luft-Wasser-Strömungen, wie sie im Wasserbau auftreten, kann von hochturbulenten Strömungen ausgegangen werden. Die direkte Abbildung aller vorhandenen turbulenten Größen- und Zeitskalen ist in den wenigsten Fällen erforderlich. Stattdessen wird auf Turbulenzmodelle zurückgegriffen, welche das turbulente Verhalten der Strömung mit Hilfe von Modellen vereinfacht wiedergeben. Dagegen ist die direkte Abbildung der örtlich variablen Grenzfläche bei separierten Strömungen von essentieller Bedeutung. Dies ist numerisch eine große Herausforderung, da an der Grenzfläche Diskontinuitäten in den physikalischen Eigenschaften vorhanden sind, welche numerisch schwer abzubilden sind. Für die Modellierung von dispersen Strömungen kann die Bewegung der dispersen Partikel entweder explizit mit Hilfe der Euler-Lagrange-Methoden oder implizit mit Hilfe der Euler-Euler-Methode modelliert werden. Generell kann die Strömung von newtonschen Fluiden mathematisch mit Hilfe der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben werden. Die genannten Gleichungen sind nicht-linear, gekoppelt und nur in Sonderfällen analytisch lösbar. Um sie lösen zu können, werden sie mit Hilfe von numerischen Methoden diskretisiert und in lineare Gleichungssysteme umgeformt. Dafür werden meist die Finite-Differenzen-, die Finite-Volumen- oder die Finite-Elemente-Methode verwendet. Abhängig von den abzubildenden Phänomenen und Skalen werden die Navier-Stokes-Gleichungen für die Modellierung von Mehrphasenströmungen (entsprechend der nachfolgend beschriebenen Methoden) erweitert und angepasst. In den folgenden Ausführungen und den unten gezeigten Beispielen wurde die Finite-Differenzen-Methode für die zeitliche Diskretisierung und die Finite-Volumen-Methode für die örtliche Diskretisierung auf dreidimensionalen, hexaederdominanten Gittern verwendet.

Modellierung ohne freie Wasseroberfläche

In einigen Anwendungen des Wasserbaus kann bei der numerischen Modellierung der Strömung die freie Wasseroberfläche vernachlässigt werden. In diesem Fall können die Navier-Stokes-Gleichungen ohne Mehrphasenerweiterung zusammen mit einem passenden Turbulenzmodell diskretisiert und gelöst werden. Die umgebende Luft wird vernachlässigt und das System wird als „geschlossen“ modelliert. Dafür wird die Wasseroberfläche als „Wand ohne Reibung“ definiert. Die Lage der Wasseroberfläche muss bekannt sein. Mit Hilfe dieser Methode können im Wasserbau z.B. Geschwindigkeits- und Druckfeld bei der Umströmung eines Schiffkörpers oder Widerstandsbeiwerte für bestimmte Bauteile ermittelt werden.

Modellierung mit freier Wasseroberfläche - Volume-of-Fluid Methode

Die 1981 von Hirt und Nichols publizierte Volume-of-Fluid-Methode (VoF-Methode) ist die im Wasserbau am häufigsten eingesetzte Methode für die Modellierung von Luft-Wasser-Strömungen, bei denen die freie Oberfläche abgebildet werden soll. Mit ihr lassen sich nicht-mischbare Fluide in separierten Strömungen abbilden. Der Massen- und Impulsaustausch zwischen den Phasen kann nicht abgebildet werden. Disperse Partikel werden nur dann physikalisch korrekt modelliert, wenn sich deren Durchmesser über mehrere Zellen des Berechnungsgitters erstreckt. Für die Modellierung der Strömung werden eine Massen- und eine Impulserhaltungsgleichung für die Mischung der Fluide in jeder Zelle gelöst. Zusätzlich beschreibt eine Advektionsgleichung den Transport des volumetrischen Füllgrads der Zelle. Bei einem Füllgrad von 1 ist die vorhandene Zelle mit Wasser gefüllt, bei einem Füllgrad von 0 ist nur Luft in der Zelle vorhanden. Zellen mit Zwischenwerten beinhalten die Grenzfläche. Häufig verwischt die scharfe Grenzfläche zwischen den Phasen durch die auftretende numerische Diffusion bei der Diskretisierung der Advektionsgleichung. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, können Diskretisierungsmethoden höherer Ordnung eingesetzt werden. Zusätzlich wurden Methoden für die geometrische Rekonstruktion oder die künstliche Schärfung der Grenzflächen entwickelt, welche die Abbildung der Grenzfläche verbessern. Das Verhalten disperser Partikel wie Blasen oder Tropfen, welche kleiner sind als die Zellen des Berechnungsgitters, kann mit der VoF-Methode nicht korrekt abgebildet werden.

Modellierung von dispersen Strömungen

Euler-Euler Methode

Bei der Euler-Euler Methode wird die Bewegung beider Fluide von einem festen Betrachtungspunkt aus beschrieben. Eine der Phasen wird als disperse Phase betrachtet, die zweite Phase wird als kontinuierliches Fluid beschrieben. Für beide Phasen wird je eine Massen- und eine Impulserhaltungsgleichung gelöst. Zusätzlich werden in der Impulsgleichung Quellterme eingeführt, die den Impulsaustausch zwischen den Phasen modellieren. Die Methode eignet sich für die Modellierung von Zweiphasenströmungen, bei der sich die Fluide vollständig durchdringen und die in Wechselwirkung zueinander stehen. Die Wirkung der Masse der Partikel steht im Vordergrund, das einzelne Partikel kann nicht gesondert betrachtet werden. Die Definition der Quellterme muss über empirische Betrachtungen erfolgen und ist somit für jede Anwendung neu zu betrachten. Im Wasserbau wird die Methode praktisch nie eingesetzt, da die Abbildung einer klar definierten Grenzfläche zwischen den Phasen (also des Wasserspiegels) nicht möglich ist.

Euler-Lagrange Methode

Die Euler-Lagrange-Methode beschreibt die kontinuierliche Phase in einem ortsfesten Koordinatensystem, die disperse Phase wird mit Hilfe von diskreten, sich bewegenden Partikeln auf einem sich mitbewegenden Koordinatensystem modelliert. Die Bewegung der Partikel resultiert aus den Kräften, die durch die Fluidströmung und die Partikel-Partikel-Interaktion auf die Partikel wirken. Der Impuls des Partikels auf das kontinuierliche Fluid wird über Quellterme in der Impulsgleichung

der kontinuierlichen Phase modelliert. Diese Methode eignet sich für disperse Strömungen, bei denen die dispersen Partikel nur einen kleinen Volumenanteil des Fluids einnehmen.

Anwendungsbeispiele

Um die Möglichkeiten und Grenzen der VoF-Methode aufzuzeigen, werden im folgenden Modelle für typische wasserbauliche Fragestellungen diskutiert.

Modellierung einer Sparbeckenfüllung

Im Rahmen der Neubauplanung der Main-Donau-Kanal Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn musste die notwendige Höhe der Sparbeckenwände bestimmt werden. Die Höhe ist abhängig von der maximalen Auslenkung des Wassers bei der Füllung der Sparbecken. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe einer dreidimensionalen, numerischen Simulation des Füllvorgangs mit Hilfe des VoF-Lösers interFoam der CFD-Bibliothek OpenFOAM[®]. Das Rechengitter beinhaltete den Sparbeckenzulauf, die Umlenkkräfte in den Zulaufkanälen sowie das Sparbecken (siehe Bild 1) und wurde mit dem Gittergenerator snappyHexMesh erzeugt. Um die Umlenkkräfte in den Sparbeckenzulaufen und die Wasseroberfläche im Sparbecken gut abzubilden, wurde hier das Gitter verfeinert. Das endgültige Gitter bestand aus etwa 6 Mio. Zellen.

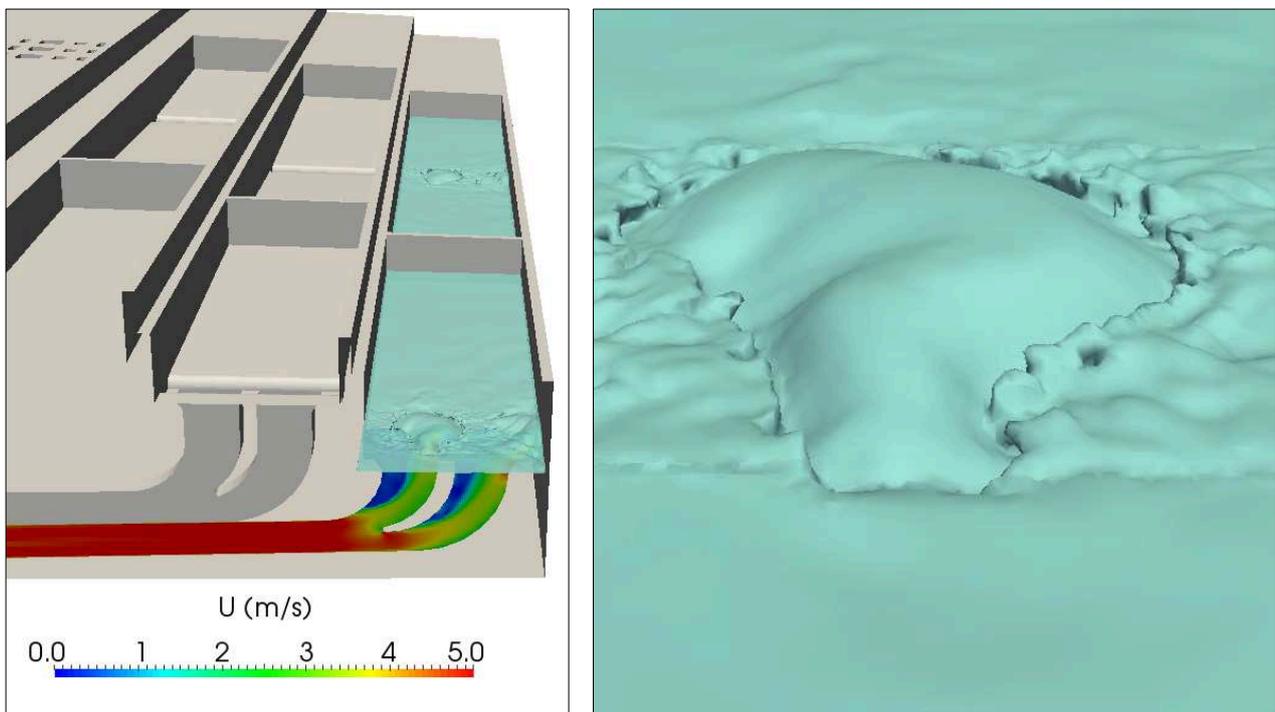


Bild 1: links: Übersicht der Simulation mit Schnitt durch den Zulaufkanal; rechts: Detailansicht des auftürenden Wassers über dem Sparbeckenzulauf; Isofläche bei Füllgrad=0,5.

Am unteren Ende des Zulaufs wurde eine zeitabhängige Zufluss-Randbedingung vorgegeben, welche den Entleerungsvorgang der Schleuse in die Sparbecken simuliert. An der Geometrie wurde eine slip-Randbedingung vorgeschrieben, der Rand oberhalb des Sparbeckens wurde mit einer

atmosphärischen Randbedingung ($p=\text{const.}$) definiert. Die auftretende Turbulenz wurde mit Hilfe des k - ω -SST Turbulenzmodells modelliert. Für die Auswertung wurde die Wasserspiegelerhöhung über dem Sparbeckenzulauf beobachtet. Dafür wurde die Isolinie betrachtet, bei der der volumetrische Füllgrad der Zellen mit Wasser einen Wert von 0,5 hat. Ein Füllgrad von 0,5 bedeutet, dass sich die Grenzfläche zwischen den Phasen in der Zelle befindet. Somit kann mit Hilfe der Isolinie die Wasseroberfläche approximiert werden. Je feiner das verwendete Gitter ist, desto genauer kann die Grenzfläche über den Füllgrad abgebildet werden. Da die Methoden, die zur Diskretisierung der Gleichung für den Füllgrad jedoch dazu tendieren, die physikalisch scharfe Grenze zwischen den Phasen zu verschmieren, ist es oft besser die Wasseroberfläche über den Druck zu approximieren. Das Bild 1 zeigt das „Aufpilzen“ des Wassers im Sparbecken beim größten Zufluss. Dieser Zustand wurde für die Bemessung der Höhe der Sparbeckenwände als maßgeblich erachtet. Der verwendete Löser *interFoam* ist für die Abbildung der Füllung des Sparbeckens geeignet. Entsprechende Gitterauflösung sowie sorgfältige Auswahl der Diskretisierungsmethoden tragen zu einem guten Ergebnis bei.

Modellierung einer Schleusenfüllung

In einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben wird in der BAW momentan die Umsetzbarkeit eines neuen Schleusenfüllsystems überprüft. Das vorgeschlagene System eignet sich für Schleusen mit großen Fallhöhen ($>10\text{m}$), bei welchen die Füllung über ein unter der Schleuse liegendes Druckkammersystem erfolgt. Die Druckkammer wird zum einen über die Sparbecken, zum anderen vom Oberwasser befüllt. Im neuen System wird das Wasser über einen senkrechten Füllschacht eingeleitet, welcher durch ein Drucksegment-Obertor verschlossen wird (siehe Bild 2).

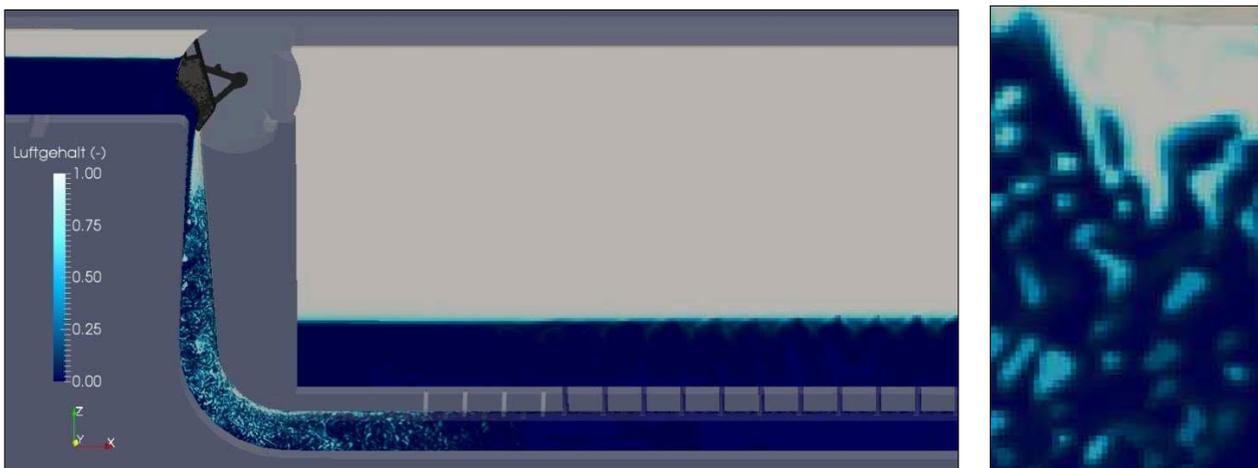


Bild 2: links: Füllung der Schleuse mit der VoF-Methode, Schnitt durch das Modell; rechts: Detail im Füllschacht

Durch Drehung des Obertors wird der Schacht freigegeben. Die Füllung wurde mit Hilfe des *interDyMFoam* Löser simuliert, der die Strömung analog zum *interFoam* Löser mit der VoF-Methode modelliert und zusätzlich eine Bewegung des Gitters zulässt. Während der Simulation wurde das Obertor mit konstanter Öffnungsgeschwindigkeit gedreht. Es entsteht ein frei fallender Strahl, der

auf die freie Wasseroberfläche im Schacht auf Höhe des Unterwassers trifft. Durch das Eintauchen des Strahls wird Luft unter die Wasseroberfläche gezogen. Die entstehenden Luftbläschen werden mit der Strömung in die Druckkammer transportiert. Da die Gitterzellen jedoch größer als die einzelnen Blasen sind, entstehen Zellen, in denen der Wert des Füllgrades zwischen 0 und 1 liegt. Die Phasengrenze der Blasen kann nicht abgebildet werden und es entstehen Zellen mit „nicht-physikalischen Fluidanhäufungen“ in denen die Dynamik der Blasen nicht richtig abgebildet werden kann (Damian 2013). Da der starke Lufteintrag Auswirkungen auf die Nutzbarkeit der Schleuse haben könnte, ist die VoF Methode in diesem Fall nicht ausreichend für die Untersuchungen. Alternative Methoden, wie die oben genannte Euler-Euler oder Euler-Lagrange Methode sind ebenfalls nicht geeignet, da sie die freie Wasseroberfläche in der Schleusenkammer nicht gut abbilden können. Es wird daher derzeit eine neue Methode entwickelt, die sowohl die freie Wasseroberfläche in der Schleusenkammer als auch den Lufteintrag und die Blasendynamik abbilden soll.

Zusammenfassung

Mit Hilfe von geeigneten Mehrphasen-Modellen können viele Fragestellungen im Wasserbau bearbeitet werden. Für Simulationen, bei denen die freie Wasseroberfläche abgebildet werden soll ohne dass eine Durchmischung von Luft und Wasser z. B. durch brechende Wellen oder eintauchende Strahlen stattfindet, ist die VoF-Methode ein passendes Werkzeug. Die Qualität der Simulation ist dabei stark abhängig von der genauen Umsetzung der Methode sowie von den verwendeten Diskretisierungsschemata für die numerische Approximation der Gleichungen. Außerdem ist eine passende Gitterauflösung notwendig, um die hydraulisch relevanten Phänomene abzubilden. In der BAW wird zumeist der in OpenFOAM implementierte VoF-Löser *interFoam* für die Modellierung von dreidimensionalen Mehrphasenströmungen eingesetzt. Durch ausführliche Tests wurden die notwendigen Einstellungen optimiert und die Simulationen zeigen zufriedenstellende Ergebnisse. Sobald jedoch eine für die Hydraulik des Modells relevante Durchmischung des Wassers mit Luftblasen oder ein Strahlerfall in Tropfen auftritt, ist die VoF Methode nur noch eingeschränkt geeignet. Derzeit wird an Weiterentwicklungen gearbeitet, die diese Phänomene besser als bisher beschreiben sollen.

Literatur

- Damian, Santiago Marquez (2013): An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces. Doktorarbeit. Universidad Nacional Del Litoral. Facultad de Ingenieria y Ciencias Hidricas.
- Hirt, C.W; Nichols, B.D (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. In *Journal of Computational Physics* 39 (1), pp. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- Ishii, M. (1975): Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. Paris: Eyrolles (Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, 22).