

Teilprojekt/Arbeitskreisgruppe B6

Titel

Dreidimensionale Modellierung und effiziente numerische Beschreibung des Kontakts zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten

Projektleitung/-bearbeitung

Sauer, Roger A., Prof., Ph.D. (Leitung)
Harmel, Maximilian, M.Sc. (Bearbeitung)
Aachen Institute for Advanced Study in Computational
Engineering Science
Schinkelstraße 2
52062 Aachen

Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojekts B6 ist es den Kontakt zwischen einer abkühlenden Schmelze und einem Festkörper mit rauer Oberfläche numerisch effizient zu beschreiben. Der finite Elemente Code der *AICES contact mechanics group* ermöglicht bereits effiziente Simulationen des mechanischen fest-flüssig Kontakts durch Verwendung einer Membranformulierung. Allerdings wird dabei eine ruhende Schmelze angenommen, ihre Strömung wird vernachlässigt. Im laufenden Jahr ist die effiziente Modellierung der flüssigen Schmelze eine zentrale Aufgabe des Teilprojekts.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Entwicklung eines Modells für den thermischen Kontakt zwischen rauen Oberflächen und erstarrender Schmelze.

Vorgehensweise

Die verwendete Membranformulierung ermöglicht eine besonders effiziente Beschreibung von Flüssigkeiten mit konstanter oder hydrostatischer Druckverteilung, da sie lediglich eine Diskretisierung der Oberfläche erfordert. Dadurch verringert sich die Anzahl der Freiheitsgrade und der damit verbundene Rechenaufwand typischerweise um mehrere Größenordnungen. Eine volumetrische Diskretisierung würde außerdem die Verwendung von ineffizienteren Eulerischen Elementen erfordern oder eine häufige Neuvernetzung zur Folge haben. Beide Möglichkeiten führen zu einer weiteren Erhöhung des Rechenaufwands. Um die Strömung innerhalb der Flüssigkeit geschickt zu modellieren und mit der

Membranformulierung zu koppeln wurde eine Methode gesucht, die ohne volumetrische Diskretisierung realisierbar ist. Diese wurde in der Boundary Element Methode (BEM) für Stokes-Strömung gefunden. Die Annahme von Stokes-Strömung (auch schleichende Strömung genannt) ist zwar auf kleine Reynoldszahlen begrenzt, jedoch sind diese Bedingungen (niedrige Geschwindigkeiten, hohe Viskosität und kleine Abmessungen) in vielen Anwendungen des SFB vorzufinden.

Nach einer detaillierten Literaturrecherche erfolgte die Implementierung der zweidimensionalen BEM für stationäre Stokes-Strömung. Ihre Leistungsfähigkeit wurde anhand von Anwendungsfällen in freier Strömung sowie in abgeschlossenen Kavitäten untersucht. Bei der BEM müssen singuläre Integrale gelöst werden. Daher wurden spezielle Quadraturregeln verwendet und ihr Einfluss auf die Lösung untersucht.

Da für den SFB eine transiente Betrachtung der Strömung erforderlich ist, wurde anschließend die BEM für instationäre Stokes-Strömung implementiert. Dabei wurde zunächst eine Variante realisiert, die das Lösen von Flächenintegralen (Volumenintegrale in 3D) erfordert. Diese Variante ist leichter zu implementieren, aber durch die volumetrische Diskretisierung und Integration nicht besonders zielführend. Daher wurden zwei Varianten der BEM untersucht, bei denen lediglich Randintegrale berechnet werden müssen, und mit ihrer Implementierung begonnen.

Der thermische Kontakt zwischen rauer Oberfläche und flüssiger Schmelze während der gesamten Erstarrung soll in einem Modell beschrieben werden. In einer Kooperation mit TP B9 wurde dazu zunächst der fest-flüssig und der fest-fest Kontakt separat betrachtet. Bei mehreren Treffen wurde dabei sichergestellt, dass beide Teilmodelle aufeinander abgestimmt sind und im weiteren Verlauf zu einem Gesamtmodell gekoppelt werden können.

Ergebnisse

Als erstes numerisches Experiment wurde ein rotierender Zylinder (konstante Winkelgeschwindigkeit) in einem Fluid betrachtet. Das Geschwindigkeits- und das Druckfeld wurden mit der stationären BEM gelöst und mit der analytischen Lösung verglichen. Da die stationäre 2D BEM für Stokes-Strömung nur schwach (logarithmisch) singulär ist, kann die

gewöhnliche Gauss-Legendre Quadratur verwenden werden. Allerdings stellte es sich heraus, dass die Verwendung spezieller Quadraturformeln für logarithmisch singuläre Funktionen eine wesentlich schnellere Konvergenz gegen die analytische Lösung bewirken.

Weiterhin wurde die Simulation eines Fluids in einer rechteckigen Kavität modelliert. Dabei wird der Deckel der Kavität mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Das resultierende Geschwindigkeitsfeld stimmt mit Ergebnissen aus der Literatur überein und ist physikalisch nachvollziehbar. Eine Rotation der Geometrie um beliebige Winkel führte zu gleichen Ergebnissen.

Die transiente BEM wurde ebenfalls anhand einer Kavitätsströmung untersucht. Hier startet der Deckel aus der Ruheposition und wird nach einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil bewegt. Die angesprochene BEM-Variante, die Volumenintegrale enthält, führt dabei für verschiedene Geschwindigkeitsprofile zu physikalisch nachvollziehbaren Ergebnissen. Die Implementierung der transienten BEM ohne volumetrische Diskretisierung und Integration hat bisher noch keine korrekten Ergebnisse geliefert.

In der Zusammenarbeit bezüglich des thermischen Kontakts an rauen Oberflächen wurde von den Kooperationspartnern folgende Aufteilung getroffen: B6 fest-flüssig, B9 fest-fest.

Als Resultat der Literaturrecherche wurden von TP B6 zwei geeignete Oberflächenbeschreibungen für den fest-flüssig Kontakt gewählt. Das stärker vereinfachende Modell wurde bereits implementiert und zeigt qualitativ nachvollziehbare Ergebnisse. Das zweite Oberflächenmodell ist hingegen noch nicht vollständig implementiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Um die Strömung im Inneren der Schmelze in die bestehende FE-Formulierung für fest-flüssig Kontakt zu integrieren, wurde die BEM für Stokes-Strömung untersucht und implementiert. Dabei liefert die BEM gute Ergebnisse für stationäre Strömungen, während das Lösen von instationären Problemen ohne volumetrische Diskretisierung noch nicht zu korrekten Ergebnissen führt. Nach erfolgreicher Implementierung und Validierung (auch gegen vollvolumetrische CFD-Simulationen)

müssen BEM und FE-Methode gekoppelt werden. Diese gekoppelte Formulierung soll verwendet werden um eine Füllsimulation durchzuführen. Die Simulationsergebnisse werden mit Ergebnissen von TP B5 und aus realen Experimenten verglichen und kooperativ veröffentlicht. In weiteren Schritten soll außerdem der Wärmetransfer und die damit verbundene Erstarrung berücksichtigt werden. Dabei wird der Wärmetransfer zwischen Bauteil und Schmelze durch das thermische Kontaktmodell abgebildet werden, während die Wärmeleitung im Fluid ebenfalls durch die BEM gelöst werden soll. Zur Berücksichtigung der Erstarrung ist zunächst eine Interpolation zwischen linearer Festkörper- und Strömungsdynamik vorgesehen. Außerdem soll das bestehende Modell auf drei Dimensionen erweitert und unter Verwendung von isogeometrischen Elementen validiert werden. Das thermische Kontaktmodell wird zunächst um die zweite Oberflächenbeschreibung erweitert. Daraufhin werden die Ergebnisse mit beiden Oberflächenmodellen verglichen. Um ein Kontaktmodell für den gesamten Erstarrungszustand zu erhalten, müssen die Teilmodelle von B6 und B9 verknüpft werden. Das vollständige Modell wird genutzt werden um den Wärmetransfer bei einem Gießvorgang zu beschreiben. Die Simulationsergebnisse werden mit real gemessenen Daten verglichen und in einem gemeinsamen Paper veröffentlicht.

Veröffentlichungen

HARMEL, M., SAUER, R.A., BOMMES, D.: Volumetric mesh generation from T-spline surface representations. *Computer Aided Design* 82, pp. 13-28, 2017

RASOOL, R., CORBETT, C.J., SAUER, R.A.: A strategy to interface isogeometric analysis with Lagrangian finite elements - application to incompressible flow problems. *Computers & Fluids* 127, pp. 182-193, 2016