



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

**Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik
Uwe Janoske (Hrsg.)**

Gian Simon Härdi

**MODELLIERUNG DÜNNER
FLUIDFILME AUF BELIEBIG
GEKRÜMMTEN OBERFLÄCHEN
MIT EINEM KOMBINIERTEN
SMOOTHED-PARTICLE-
HYDRODYNAMICS- UND
FINITE-PARTIKEL-ANSATZ**



Modellierung dünner Fluidfilme auf beliebig gekrümmten Oberflächen mit einem kombinierten Smoothed-Particle- Hydrodynamics- und Finite-Partikel-Ansatz

Dissertation zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
in der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
an der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt am 30. Oktober 2019 von

Gian Simon Härdi
aus Schiers

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske (Bergische Universität Wuppertal)
2. Gutachter: Prof. Dr. habil. Michael Schreiner (NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs)

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Januar 2020

Berichte des Fachgebiets für Strömungsmechanik

Gian Simon Härdi

**Modellierung dünner Fluidfilme auf beliebig
gekrümmten Oberflächen mit einem kombinierten
Smoothed-Particle- Hydrodynamics- und
Finite-Partikel-Ansatz**

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7315-7

ISSN 2195-4100

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Auf dem Einband dieser Arbeit steht nur mein Name als Autor. Dem zu trotz war das Schreiben dieser Dissertation nur möglich durch die Unterstützung meines Umfelds, dem ich zu grossem Dank verpflichtet bin.

Allen voran möchte ich meinen Betreuern Prof. Dr. Michael Schreiner und Prof. Dr. Uwe Janoske danken, die mir von Anfang bis Ende dieser Arbeit zur Seite standen und bei denen ich jederzeit Hilfestellung zu allen möglichen und unmöglichen Problemen erhalten habe; ohne sie wäre ich an manch einem Stolperstein auf dem Weg zum Dokortitel wohl hängen geblieben. In besonders guter Erinnerung werden mir die vielen spannenden Diskussionen bleiben, für die sie trotz überquellendem Terminplan immer Zeit gefunden haben.

An der Bearbeitung des zur Dissertation gehörenden Projektes war ein ganzes Team beteiligt. Speziell erwähnen möchte ich Thomas Bucher. Sein unermüdlicher Einsatz bei den Experimenten hat viele Messungen überhaupt erst ermöglicht, und die gemeinsamen Stunden mit meist von Tinte blau gefärbten Händen waren immer kurzweilig. Auch den Mitgliedern der Simulationsgruppe des Industriepartners ein herzliches Dankeschön für ihre Mitarbeit im Projekt. Ohne Raphael Lindegger und Simon Haas gäbe es wohl keinen Prüfstand und der Programmcode würde von ungefundnen Fehlern nur so wimmeln. Danke auch an Ernst Dober, Marcel Koller und Martin Geiser für die Projektleitung, sie haben dafür gesorgt dass ich die festgelegten Ziele nie aus den Augen verloren habe.

Bei den beim Schreiben einer Arbeit üblichen Motivationsproblemen konnte ich jederzeit auf die Unterstützung meiner Arbeitskollegen am Institut für Computational Engineering zählen. Egal ob Stil-Tipps beim Kaffee oder gemeinsames Ärgern über unerklärliche Eigenarten von L^AT_EX beim Feierabend-Bier, hier habe ich immer ein offenes Ohr gefunden.

Auch meiner Familie gebührt ein Platz in dieser Danksagung. Für die Geduld, die unterstützenden Worte, das Korrekturlesen und natürlich für die Hilfe bei Experimenten mit sehr klebrigem Zuckerrübensirup in der Badewanne.

Für Olivia. Danke, dass du mich mit all meinen verrückten Ideen ertragen hast, und danke, dass ich diese wundervolle Zeit mit dir teilen darf.

Kurzfassung

Die Modellierung von Fluiden als Kontinuum und deren Simulation mithilfe numerischer Lösung der resultierenden Gleichungen ist eine weit verbreitete Methode zum Studium von Strömungsvorgängen. Für Strömungen, deren geometrische Ausdehnung in eine der Raumrichtungen sehr viel kleiner ist als in die anderen, gibt es spezielle Modellvereinfachungen. Für ein gegebenes System kann mit diesen Flachwassergleichungen eine im Vergleich zu einer voll aufgelösten Simulation sehr viel schnellere Berechnung durchgeführt werden ohne viel an Realitätsnähe einzubüssen. Bei Strömungen in kleinen Größenskalen müssen bei der Modellierung Effekte berücksichtigt werden, die bei der Simulation makroskopischer Aufgaben vernachlässigt werden können, wie zum Beispiel die Oberflächenspannung und die Kontaktwinkelkraft. Die Modellierung dieser Effekte hat Auswirkungen auf die verwendeten numerischen Methoden.

Als Diskretisierungsmethode zur numerischen Lösung der zugrundeliegenden Gleichungen wird die netzlose Methode der Smoothed-Particle-Hydrodynamics verwendet. Diese erlaubt es, die vorhandene Rechenleistung sehr effizient auf nur teilweise benetzte Gebiete anzuwenden. Zusätzlich ist der Algorithmus zur Implementation auf Graphikkarten ideal geeignet, was die benötigte Rechenzeit ebenfalls günstig beeinflusst.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Frameworks, das die Simulation von dünnen Fluidfilmen auf beliebigen Oberflächen erlaubt. Dazu werden die für die Strömungsvorgänge wichtigen Effekte identifiziert und eine geeignete Modellierung erarbeitet. Es wird gezeigt, wie die resultierenden Gleichungen mit Hilfe von Smoothed-Particle-Hydrodynamics diskretisiert werden können. Dabei wird insbesondere auf die Schwierigkeiten der Methode bei der Approximation höherer Ableitungen eingegangen. In der Form der Finite-Partikel-Methode wird eine Lösung dieses Problems vorgestellt, die ein lokales Galerkin-Verfahren für die Berechnung von Ableitungen benützt. Zusätzlich wird ein Verfahren entwickelt, mit dem die Kontaktwinkelkraft als Quellterm in die Impulsgleichung integriert und dieser in die Diskretisierung mit einbezogen werden kann. Abschliessend wird die Simulation anhand einer Kombination von analytischen Lösungen und Messungen mit realen Fluidfilmen validiert. Dabei wird an mehreren Beispielen aufgezeigt, für welche Situationen die verwendeten Modellannahmen geeignet sind.

Abstract

The modeling of a fluid as a continuum and its simulation using numerical solutions of the governing equations is a well known method to get insights into fluid flows. If the flow is almost entirely restricted to two dimensions and has a very small extent in the third dimension, it is possible to use simplified models. They are called shallow water equations and can be used to do fast simulations, which use less computing power for a given problem without losing much of their predicting power. Applying these equations to small-scale problems requires the consideration of effects which can be neglected on larger scales. This includes the surface tension between fluids and the contact angle force during the wetting and dewetting of surfaces. Modeling these forces has implications on the selection of appropriate numerical methods.

To discretize the governing equations, a meshless method called smoothed particle hydrodynamics is used. This method is shown to be very efficient when simulating only partially wetted domains. Additionally, it is straight forward to implement this algorithm to run on graphics processing units which reduces the required computing time even further.

The aim of this work is the development of a framework which is able to simulate the flow of thin fluid films on arbitrary surfaces. The effects which impact such a flow are identified and appropriate models to incorporate them into a simulation are developed. It is shown how the resulting equations can be discretized using smoothed particle hydrodynamics. Special attention is given to the approximation of higher order derivatives. In classical smoothed particle hydrodynamics, the calculation of these derivatives has shown to be very unstable. This can be overcome by using a finite particle method, which uses a local Galerkin procedure to calculate derivatives. Additionally, a method to incorporate the contact angle force as a source term into the momentum equation including an appropriate discretization method is developed. The validity of the used model and the implementation is shown by comparing simulations with analytic solutions and measurements of real film flows, using several different examples.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
------------------------------	-----------

Symbolverzeichnis	XIII
--------------------------	-------------

1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	3
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	5
2 Modellierung von dünnen Fluidfilmen	9
2.1 Mathematische Beschreibung von Strömungsvorgängen dünner Filme	10
2.1.1 Problembeschreibung	10
2.1.2 Flachwassergleichungen	12
2.2 Quellterme	17
2.2.1 Volumetrische Kräfte	17
2.2.2 Druckbasierte Kräfte	17
2.2.3 Scherspannungen	20
2.2.4 Kontaktwinkelkraft	23
2.2.5 Auflistung aller Kräfte	27
2.3 Smoothed-Particle-Hydrodynamics	27
2.3.1 Herleitung Grundgleichung	27
2.3.2 Kerne	30
2.3.3 Anwendung auf die Flachwassergleichungen	34
2.3.4 Zeitschrittverfahren	37
2.4 Erweiterung von SPH mit der Finite-Partikel-Methode	38
2.4.1 Herleitung der Finite-Partikel-Methode	39
2.4.2 Numerische Tests	42
2.5 Abtropfmodelle	46
2.5.1 Impulsabtropfen an Kanten	47
2.5.2 Schwerkraftbedingtes Abtropfen	50
3 Implementierung der numerischen Modelle	53
3.1 Oberflächen-Diskretisierung	54
3.1.1 Triangulierung	54
3.1.2 Krümmungsberechnung	55

3.2	Berechnung der Partikel-Nachbarschaft	59
3.3	Randpartikel	63
3.3.1	Identifikation Randpartikel	64
3.3.2	Eigenschaften Randpartikel	65
3.3.3	Resultate	66
3.4	Fluidbewegung zwischen Oberflächen	72
3.4.1	Abtropfen	72
3.4.2	Tropfenbewegung	73
4	Validierung und Anwendung	75
4.1	Thacker-Becken	76
4.1.1	Analytisches Modell	76
4.1.2	Simulation	79
4.2	Rivulet-Strömen	82
4.2.1	Analytisches Modell	82
4.2.2	Simulation	86
4.3	Filmströmen auf Glasplatte	90
4.3.1	Experimentelles Setup	91
4.3.2	Simulation	96
4.4	Abtropfkante	103
4.4.1	Experimentelles Setup	106
4.4.2	Simulation	112
4.5	Abtropfen eines Films in einem äusseren Kraftfeld	117
4.5.1	Setup	118
4.5.2	Simulation	119
4.6	Anwendungsbeispiel mit einer komplexen Geometrie	122
4.6.1	Experimentelles Setup	125
4.6.2	Simulation	125
5	Zusammenfassung und Ausblick	129
	Literaturverzeichnis	133
	Veröffentlichungen	141
A	Herleitung SWE aus der Navier-Stokes-Gleichung	143