

BestMasters

Felix Rühle

Vielteilchendynamik in der inertialen Mikrofluidik

Eine Simulationsstudie
unter Verwendung der
Lattice-Boltzmann-Methode



Springer Spektrum

BestMasters

Mit „BestMasters“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften.

Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Felix Rühle

Vielteilchendynamik in der inertialen Mikrofluidik

Eine Simulationsstudie
unter Verwendung der
Lattice-Boltzmann-Methode



Springer Spektrum

Felix Rühle
Berlin, Deutschland

Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 2016

BestMasters

ISBN 978-3-658-17913-7

ISBN 978-3-658-17914-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-17914-4

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

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Hilfe, die Geduld und den Sachverstand von Betreuern, zahlreichen Kollegen und Freunden nicht möglich gewesen. Ich danke Prof. Holger Stark für die Betreuung und persönliche Begleitung durch diese und andere Arbeiten. Ich danke Dr. Christopher Prohm für seine unablässige Unterstützung, seine zahlreichen Hilfestellungen und Erklärungen und die Erstellung des atroos-Codes, der unter anderem die Basis dieser Arbeit bildet. Ich danke Prof. Sabine Klapp für ihre Bereitschaft, das Zweitgutachten zu erstellen. Ich danke Josua Grawitter und Florian Grabner für hilfreiche Diskussionen, ebenso wie der ganzen SRD-Subgroup. Ebenso danke ich Kevin Irmer (†) für seine Hilfe. Ein großer Dank geht an meine Eltern und an Agnes, die mir stets mit Geduld und Liebe zur Seite stand.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Abbildungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Theorie der Hydrodynamik	5
2.1 Bilanzgleichungen der Kontinuumsmechanik	5
2.1.1 Massenerhaltung	6
2.1.2 Impulserhaltung	7
2.1.3 Energieerhaltung	9
2.2 Navier-Stokes-Gleichungen	10
2.2.1 Newton'sche Flüssigkeiten	11
2.2.2 Inkompressibilität	12
2.2.3 Randbedingung	13
2.2.4 Reynoldszahl und typische Kräfte	13
2.2.5 Stokes-Gleichungen	15
2.2.6 Poiseuille-Fluss	17
2.3 Kolloide in mikroskopischen Kanälen	19
2.3.1 Kolloid-Fluid-Wechselwirkung	20
2.3.2 Hydrodynamische Wechselwirkung	22
2.3.3 Wände des Kanals	25
2.3.4 Inertiale Effekte in der Mikrofluidik	26

3	Numerische Methoden	33
3.1	Computersimulation von Fluiden	33
3.2	Lattice-Boltzmann-Simulation	36
3.2.1	BhatnagarGrossKrook-Approximation	38
3.2.2	Chapman-Enskog-Expansion	39
3.2.3	Einbinden externer Kräfte	43
3.2.4	Ränder und Immersed-Boundary-Methode	44
3.2.5	Kraftbilanz des Kolloids und Messen von Liftkräften	47
4	Ergebnisse	49
4.1	Liftkraft-Profile von Teilchenpaaren	51
4.1.1	Profile für verschiedene Positionen und Reynolds- zahlen	54
4.1.2	Skalierung der Liftkräfte mit Re^α	58
4.1.3	Abhängigkeit vom axialen Abstand	60
4.1.4	Konturplots	62
4.2	Trajektorien von Teilchenpaaren	65
4.2.1	Gedämpfte Oszillationen	67
4.2.2	Überholen	76
4.2.3	Austausch	78
4.2.4	Axiale Selbstorganisation durch inertielle Fokus- sierung	82
4.3	Kollektive Dynamik	86
5	Ergebniszusammenfassung und Ausblick	95

Literaturverzeichnis	99
-----------------------------	-----------

Anhang	109
---------------	------------

A	Notation	109
---	--------------------	-----

B	Animationen	110
---	-----------------------	-----

Abbildungsverzeichnis

3.1	Eindimensionale diskrete Delta-Funktion nach Ref. [73]	45
4.1	Schematischer Schnitt des Kanals durch die x - z -Ebene mit Fluss in z -Richtung.	49
4.2	Oben: Verlauf von $x(t)$ für die meisten links abgebildeten Radien und Reynoldszahlen. Unten: Liftkraftprofile für verschiedene Teilchenradien a und Reynoldszahlen.	51
4.3	Für ein Teilchenpaar besteht keine Symmetrie bezüglich der axialen Vertauschung, jedoch eine Symmetrie bezüglich der Spiegelung an der z -Achse (Kanalmitte).	53
4.4	Liftkraftprofile für zwei Teilchen mit Radius $a = 0.4w$ bei $Re = 5,0$	55
4.5	Liftkraftprofil für das vordere Teilchen mit Radius $a = 0.4w$ bei $Re = 5,0$ für verschiedene Positionen des hinteren Teilchens.	56
4.6	Liftkraftprofile für das vordere Teilchen mit Radius $a = 0.4w$ bei $Re = 20,0$ für verschiedene Positionen des hinteren Teilchens.	57
4.7	Skalierung der Paar-Liftkraft mit der Reynolds-Zahl bei $a = 0.4w$ für verschiedene axiale Abstände.	59
4.8	Laterale Kräfte für zwei Teilchen mit Radius $a = 0,4w$ bei $Re = 5,0$ in Abhängigkeit des axialen Abstands Δz .	61

4.9	Konturplots der Liftkraft bei verschiedenen Abständen.	63
4.10	Konturplots für hinteres und vorderes Teilchen bei einer Reynoldszahl von 5,0 und einem axialen Abstand von $3a$.	64
4.11	Parameterraum zweier Teilchen für $\Delta z = 5a$.	65
4.12	Trajektorien eines Teilchenpaares während einer gedämpften Oszillation bei $Re = 5$.	68
4.13	Gedämpfte Oszillationen eines Teilchenpaares bei $Re = 5$: zeitlicher Verlauf der x - und z -Komponenten und des axialen Abstands	69
4.14	Abklingkonstante der gedämpften Oszillationen für $\Delta z = 3,25a$.	70
4.15	Oszillationsfrequenz in Abhängigkeit der Reynoldszahl.	70
4.16	Interpretation der Oszillationen anhand der Liftkraftprofile	71
4.16	Interpretation der Oszillationen anhand der Liftkraftprofile (Fortsetzung): 3. Der axiale Abstand der Teilchen erreicht ein Maximum und beginnt sich wieder zu verringern. 4. Die lateralen Positionen der Teilchen ähneln der Anfangssituation, die relativen axialen Positionen sind verändert.	72
4.17	Axialer, lateraler und absoluter Abstand beim Überholvorgang zweier Teilchen.	76
4.18	Überholen zweier Teilchen.	77

4.19	Zeitlicher Verlauf der x - und z -Komponenten für Austauschtrajektorien eines Teilchenpaars bei $Re = 3$. . .	79
4.20	Überkreuzter Austausch beim Aufeinandertreffen zweier Teilchen.	81
4.20	Überkreuzter Austausch beim Aufeinandertreffen zweier Teilchen (Fortsetzung). Durch die periodischen Randbedingungen treffen die Teilchen ein zweites Mal aufeinander und kehren erneut um.	82
4.21	Links: Entwicklung der axialen Distanz Δz mit der Zeit für verschiedene Anfangsabstände. Rechts: Abhängigkeit des Endabstandes und der relativen Veränderung des Abstandes vom Anfangsabstand für $Re = 5, 0$ und $Re = 20, 0$	83
4.22	Laterale und axiale Positionen von Vielteilchensystemen in Abhängigkeit der Zeit	86
4.23	Ausschnitte aus Abbildung 4.22, in denen Austauschtrajektorien (links) und kurze Abschnitte von gedämpften Oszillationen (rechts) zu sehen sind.	88
4.24	Endkonfiguration von Vielteilchensystemen für $n = 8$ Kolloide und Entwicklung der Abstände zum hinteren Nachbarn mit der Zeit.	90
4.25	Endkonfiguration von Vielteilchensystemen für $n = 15$ Kolloide und Entwicklung der Abstände zum hinteren Nachbarn mit der Zeit.	91

4.25	Endkonfiguration von Vielteilchensystemen für $n = 15$ Kolloide und Entwicklung der Abstände zum hinteren Nachbarn mit der Zeit (Fortsetzung).	92
4.26	Zuordnung der axialen Abstände benachbarter Teil- chen für ein Gesamtsystem von $n = 15$ in Bänder. . . .	93