Literaturverzeichnis

[1] J. M. Ramsey. The burgeoning power of the shrinking laboratory. *Nat. Biotechnol.* 17(11): 1061–1062, 1999.

[2] J. W. Hong und S. R. Quake. Integrated nanoliter systems. *Nat. Biotechnol.* 21(10): 1179–1183, 2003.

[3] T. M. Squires und S. R. Quake. Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Rev. Mod. Phys.* 77(3): 977, 2005.

[4] O. Geschke, H. Klank und P. Telleman. *Microsystem Engineering of Lab-on-a-chip Devices.* Wiley Online Library, 2004.

[5] H Bruus. *Theoretical Microfluidics.* Oxford University Press, 2007.

[6] P. Nelson. *Biological physics.* WH Freeman New York, 2004.

[7] J. Happel und H. Brenner. *Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media.* Springer Science & Business Media, 2012.

[8] D. Di Carlo. Inertial microfluidics. *Lab Chip* 9(21): 3038–3046, 2009.

[9] H. Amini, W. Lee und D. Di Carlo. Inertial microfluidic physics. *Lab Chip* 14(15): 2739–2761, 2014.

[10] A. P. Sudarsan und V. M. Ugaz. Multivortex micromixing. *P. Natl. Acad. Sci.* 103(19): 7228–7233, 2006.

F. Rühle, *Vielteilchendynamik in der inertialen Mikrofluidik*,
BestMasters, DOI 10.1007/978-3-658-17914-4

[11] A. A. S. Bhagat, S. S. Kuntaegowdanahalli und I. Papautsky. Continuous particle separation in spiral microchannels using dean flows and differential migration. *Lab Chip* 8(11): 1906–1914, 2008.

[12] Z. Wu et al. Soft inertial microfluidics for high throughput separation of bacteria from human blood cells. *Lab Chip* 9(9): 1193–1199, 2009.

[13] G Segré und A Silberberg. Radial Particle Displacements in Poiseuille Flow of Suspensions. *Nature* 1961.

[14] J. K. Dhont. *An introduction to dynamics of colloids*. Elsevier, 1996.

[15] S. Kim und S. J. Karrila. *Microhydrodynamics: principles and selected applications*. Courier Corporation, 2013.

[16] B. Dünweg und A. J. Ladd. Lattice Boltzmann simulations of soft matter systems. *Adv. Polym. Sci.* 221: 89–166, 2009.

[17] S Reddig und H Stark. Nonlinear dynamics of spherical particles in Poiseuille flow under creeping-flow condition. *J. Chem. Phys.* 138(23): 234902, 2013.

[18] S. Reddig. “Nonlinear dynamics in colloidal model systems under confined flow”. Diss. Technische Universität Berlin, 2013.

[19] C Prohm, M Gierlak und H Stark. Inertial microfluidics with multi-particle collision dynamics. *Eur. Phys. J. E.* 35(8): 1–10, 2012.

[20] C. Prohm, F. Tröltzsch und H. Stark. Optimal control of particle separation in inertial microfluidics. *Eur. Phys. J. E.* 36(10): 1–13, 2013.

[21] C. Prohm, N. Zöller und H. Stark. Controlling inertial focussing using rotational motion. *Eur. Phys. J. E.* 37(5): 1–7, 2014.

[22] C. Prohm und H. Stark. Feedback control of inertial microfluidics using axial control forces. *Lab Chip* 14(12): 2115–2123, 2014.

[23] C. Prohm. "Control of inertial microfluidics". Diss. Technische Universität Berlin, 2014.

[24] L. Landau und E. Lifshitz. *Course of Theoretical Physics VI: Fluid mechanics*. 1987.

[25] A. Sommerfeld und E. Fues. *Mechanik der deformierbaren Medien*. Harri Deutsch Verlag, 1978.

[26] O. Reynolds, A. W. Brightmore und W. H. Moorby. *The submechanics of the universe*. Cambridge University Press, 1903.

[27] F. Irgens. *Continuum mechanics*. Springer Science & Business Media, 2008.

[28] T. M. Atanackovic und A. Guran. *Theory of elasticity for scientists and engineers*. Springer Science & Business Media, 2012.

[29] P. G. Ciarlet. *Mathematical elasticity: Three-dimensional elasticity*. Elsevier, 1993.

[30] E. B. Dussan V. The moving contact line: the slip boundary condition. *J. Fluid Mech.* 77: 665–684, 1976.

[31] C. W. Oseen. *Hydrodynamik*. Akad. Verl.-Ges., 1927.

[32] A. T. Chwang und T Wu. Hydromechanics of low-Reynolds-number flow. Part 2. Singularity method for Stokes flows. *J. Fluid Mech.* 67(04): 787–815, 1975.

[33] E. M. Purcell. Life at low Reynolds number. *Am. J. Phys* 45(1): 3–11, 1977.

[34] J. A. Schonberg und E. Hinch. Inertial migration of a sphere in Poiseuille flow. *J. Fluid Mech.* 203: 517–524, 1989.

[35] H. A. Stone, A. D. Stroock und A. Ajdari. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36: 381–411, 2004.

[36] H. Faxén. Der Widerstand gegen die Bewegung einer starren Kugel in einer zähen Flüssigkeit, die zwischen zwei parallelen ebenen Wänden eingeschlossen ist. *Ann. Phys.* 373(10): 89–119, 1922.

[37] G. Taylor. “Analysis of the swimming of microscopic organisms”. In: *Proc. R. Soc. A*. Bd. 209. 1099. The Royal Society. 1951, S. 447–461.

[38] E. Gauger und H. Stark. Numerical study of a microscopic artificial swimmer. *Phys. Rev. E* 74(2): 021907, 2006.

[39] M. Reichert. “Hydrodynamic Interactions in Colloidal and Biological Systems”. Diss. Universität Konstanz, 2006.

[40] P. Ganatos, R. Pfeffer und S. Weinbaum. A numerical-solution technique for three-dimensional Stokes flows, with application to the motion of strongly interacting spheres in a plane. *J. Fluid Mech.* 84(01): 79–111, 1978.

[41] B. A. Grzybowski, H. A. Stone und G. M. Whitesides. Dynamic self-assembly of magnetized, millimetre-sized objects rotating at a liquid–air interface. *Nature* 405(6790): 1033–1036, 2000.

[42] A. Zöttl und H. Stark. Hydrodynamics determines collective motion and phase behavior of active colloids in quasi-two-dimensional confinement. *Phys. Rev. Lett.* 112(11): 118101, 2014.

[43] J. Rotne und S. Prager. Variational treatment of hydrodynamic interaction in polymers. *J. Chem. Phys.* 50(11): 4831–4837, 1969.

[44] E. Hinch und L. C. Nitsche. Nonlinear drift interactions between fluctuating colloidal particles: oscillatory and stochastic motions. *J. Fluid Mech.* 256: 343–401, 1993.

[45] O. Pinkus und B. Sternlicht. *Theory of hydrodynamic lubrication.* McGraw-Hill, 1961.

[46] O. Reynolds. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower’s Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Proc. R. Soc.* 40(242-245): 191–203, 1886.

[47] H. A. Lorentz. *Abhandlungen über theoretische Physik.* BG Teubner, 1907.

[48] N. Liron und S Mochon. Stokes flow for a stokeslet between two parallel flat plates. *J. Eng. Mech.* 10(4): 287–303, 1976.

[49] R. B. Jones. Spherical particle in Poiseuille flow between planar walls. *J. Chem. Phys.* 121(1): 483–500, 2004.

[50] B Chun und A. Ladd. Inertial migration of neutrally buoyant particles in a square duct: An investigation of multiple equilibrium positions. *Phys. Fluids* 18(3): 031704, 2006.

[51] D. Di Carlo et al. Continuous inertial focusing, ordering, and separation of particles in microchannels. *P. Natl. Acad. Sci.* 104(48): 18892–18897, 2007.

[52] F. P. Bretherton. The motion of rigid particles in a shear flow at low Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 14(02): 284–304, 1962.

[53] M. Zurita-Gotor, J. Bławzdziewicz und E. Wajnryb. *J. Fluid Mech.* 592(447): 2007.

[54] J. Matas, J. Morris und E. Guazzelli. Lateral forces on a sphere. *Oil Gas Sci. Technol.* 59(1): 59–70, 2004.

[55] E. S. Asmolov. The inertial lift on a spherical particle in a plane Poiseuille flow at large channel Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 381: 63–87, 1999.

[56] D. Di Carlo et al. Particle Segregation and Dynamics in Confined Flows. *Phys. Rev. Lett.* 102: 094503, 2009.

[57] D. R. Gossett et al. Inertial Manipulation and Transfer of Microparticles Across Laminar Fluid Streams. *Small* 8(17): 2757–2764, 2012.

[58] A. J. Mach und D. Di Carlo. Continuous scalable blood filtration device using inertial microfluidics. *Biotechnol. Bioeng.* 107(2): 302–311, 2010.

[59] R. Cox und H Brenner. The lateral migration of solid particles in Poiseuille flow—I Theory. *Chem. Eng. Sci.* 23(2): 147–173, 1968.

[60] B. Ho und L. Leal. Inertial migration of rigid spheres in two-dimensional unidirectional flows. *J. Fluid Mech.* 65(02): 365–400, 1974.

[61] G. K. Batchelor. *An introduction to fluid dynamics.* Cambridge university press, 2000.

[62] J. H. Ferziger und M. Peric. *Computational methods for fluid dynamics.* Springer Science & Business Media, 2012.

[63] J. Crank und P. Nicolson. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. *Adv. Comp. Math.* 6(1): 207–226, 1996.

[64] R. J. LeVeque. *Finite volume methods for hyperbolic problems.* Cambridge university press, 2002.

[65] X. He und L.-S. Luo. Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. *Phys. Rev. E* 56(6): 6811, 1997.

[66] B. Chopard et al. *The Palabos Project.* FlowKit Ltd., http://www.palabos.org. Versionen 1.4, 1.5. 2013.

[67] S. Succi. *The lattice Boltzmann equation: for fluid dynamics and beyond.* Oxford university press, 2001.

[68] P. L. Bhatnagar, E. P. Gross und M. Krook. A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems. *Phys. Rev.* 94(3): 511, 1954.

[69] Y. Qian, D. d'Humières und P. Lallemand. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation. *Europhys. Lett.* 17(6): 479, 1992.

[70] S. Chapman und T. G. Cowling. *The mathematical theory of non-uniform gases: an account of the kinetic theory of viscosity, thermal conduction and diffusion in gases.* Cambridge university press, 1970.

[71] X. Shan und H. Chen. Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components. *Phys. Rev. E* 47(3): 1815, 1993.

[72] J. Latt et al. Straight velocity boundaries in the lattice Boltzmann method. *Phys. Rev. E* 77(5): 056703, 2008.

[73] C. S. Peskin. The immersed boundary method. *Acta Numer.* 11: 479–517, 2002.

[74] T. Inamuro. Lattice Boltzmann methods for moving boundary flows. *Fluid Dyn. Res.* 44(2): 024001, 2012.

[75] K. Suzuki und T. Inamuro. Effect of internal mass in the simulation of a moving body by the immersed boundary method. *Comput. Fluids* 49(1): 173–187, 2011.

[76] Z.-G. Feng und E. E. Michaelides. Robust treatment of no-slip boundary condition and velocity updating for the lattice-Boltzmann simulation of particulate flows. *Comput. Fluids* 38(2): 370–381, 2009.

[77] W. Lee et al. Dynamic self-assembly and control of microfluidic particle crystals. *P. Natl. Acad. Sci.* 107(52): 22413–22418, 2010.

[78] Y.-S. C. Choi, K.-W. Seo und S.-J. Lee. Lateral and cross-lateral focusing of spherical particles in a square microchannel. *Lab Chip* 11(460): 2011.

[79] T. Beatus, T. Tlusty und R. Bar-Ziv. Phonons in a one-dimensional microfluidic crystal. *Nat. Phys.* 2(11): 743–748, 2006.

[80] P. Garstecki und G. M. Whitesides. Flowing crystals: nonequilibrium structure of foam. *Phys. Rev. Lett.* 97(2): 024503, 2006.

[81] J.-B. Fleury et al. Mode coupling of phonons in a dense one-dimensional microfluidic crystal. *New J. Phys.* 16(6): 063029, 2014.

[82] T. Krüger, F. Varnik und D. Raabe. Efficient and accurate simulations of deformable particles immersed in a fluid using a combined immersed boundary lattice Boltzmann finite element method. *Comp. Math. Appl.* 61(12): 3485–3505, 2011.

Anhang

A Notation

Wir notieren in dieser Arbeit alle Vektoren als fette lateinische Buchstaben $\mathbf{v}$. Tensoren werden als fette lateinische Buchstaben mit Dach $\widehat{\mathbf{T}}$ dargestellt. Im Folgenden verwenden wir die Einstein'sche Summenkonvention.

Aus der Vektoranalysis verwenden wir den Nabla-Operator ∇, der in kartesischen Koordinaten mit Einheitsvektoren $\mathbf{e}_{x,y,z}$ die Form

$$\nabla = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \tag{5.1}$$

hat. Damit notieren wir die Vektoroperationen des Gradienten, der Divergenz und der Rotation angewendet auf einen Vektor $\mathbf{v}$ als

$$\nabla \mathbf{v}, \nabla \cdot \mathbf{v}, \nabla \times \mathbf{v}. \tag{5.2}$$

Das Symbol $\times$ steht für die Operation des vektoriellen Kreuzprodukts. Mit dem Nabla-Operator stellen wir auch die Operationen der Tensoranalysis dar. Insbesondere ist die Divergenz eines Tensors definiert als der Vektor

$$c_i = \left(\nabla \cdot \widehat{\mathbf{T}}\right)_i = \nabla_j T_{ij}. \tag{5.3}$$

Ferner verwenden wir das dyadische Produkt, das zwei Vektoren

F. Rühle, *Vielteilchendynamik in der inertialen Mikrofluidik*,
BestMasters, DOI 10.1007/978-3-658-17914-4

$\mathbf{v}, \mathbf{w}$ auf einen Tensor zweiter Stufe abbildet:

$$(\mathbf{v} \otimes \mathbf{w})_{ij} = v_i w_j. \tag{5.4}$$

Den zu einem Tensor $\widehat{\mathbf{T}}$ transponierten Tensor bezeichnen wir mit $\widehat{\mathbf{T}}^t$.

B Animationen

Im OnlinePlus-Teil dieses Anhangs finden sich Animationen der besprochenen Trajektorien. Es handelt sich um eine Oszillation, eine Austauschtrajektorie und einen Überholvorgang, die in der x-z-Ebene dargestellt sind. Zusätzlich ist eine Oszillation zu sehen, bei der beide Teilchen auf der gleichen Seite des Kanals liegen. Diese kommt durch die periodischen Randbedingungen zustande und ist daher eigentlich ein Vier-Teilchen-Effekt.

Weiterhin sind die Animationen von Teilchenkollektiven mit 8 und 15 Teilchen angehängt.