

■ Der tropische Ozean im Latte Macchiato

Bei der Zubereitung eines Latte Macchiato entsteht nur dann eine Schichtung, wenn der Espresso schnell genug in die Milch gegeben wird.

Getränke des Alltags haben es Fluidphysikern angetan – als Inspiration und um immer wieder wunderbare und wichtige physikalische Phänomene zu erklären. Am berühmtesten ist sicher der Kaffeefleck: 1997 fanden Robert Deegan und Kollegen von der Universität Chicago die Ursache für den ringförmigen Fleck, der von einem verdunstenden Kaffeetropfen übrig bleibt. Er entsteht durch die Strömung der kolloidalen Kaffeeteilchen zum Rand des Tropfens, wo die Flüssigkeit aus geometrischen Gründen bevorzugt verdampft [1]. Die Veröffentlichung wurde inzwischen mehr als 3000-mal zitiert.

Der Kaffeefleck ist paradigmatisch für viele Probleme aus der Physik der Mikrofluide mit Phasenübergängen. Er inspirierte die Fluidphysiker auch, einen verdampfenden Ouzotropfen zu untersuchen und hierbei die Physik und Chemie von Mischungen, bestehend aus drei Flüssigkeiten (ternär), besser zu verstehen [2, 3]. Diese sind beispielsweise in der Diagnostik oder der Prozesstechnologie relevant. An einem eintrocknenden Whiskytropfen kann man dagegen etwas über das Wechselspiel zwischen kapillaren Effekten, Coatings und oberflächenaktiven Substanzen lernen [4].

In dieser Tradition steht auch die neue Arbeit von Howard Stone und Kollegen aus Princeton zur Fluidynamik in einem Latte

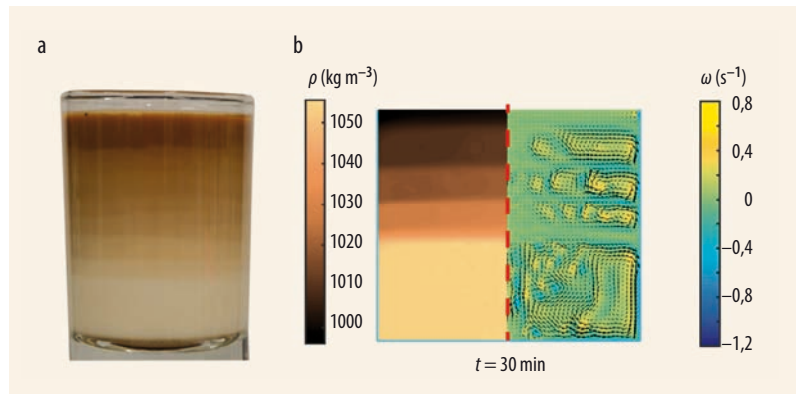


Abb. 1 Im Latte Macchiato ist deutlich eine horizontale Schichtung zu erkennen (a). Das Bild wurde 20 Minuten nach der schnellen Einfuhr des Espressos in die Milch aufgenommen. Eine entsprechende numerische Simulation dieses Prozesses mit den Navier-Stokes-Glei-

chungen (b), gekoppelt an die Advektionsgleichungen für Temperatur und Konzentration, zeigt das gleiche Phänomen: links die Dichte ρ der Flüssigkeit mit der gleichen horizontalen Schichtung, rechts die Vortizität $\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{u}$, wobei $\vec{u}(\vec{x}, t)$ das Geschwindigkeitsfeld ist.

Macchiato [5]. Bei dessen Zubereitung wird heißer Espresso in heiße Milch geschüttet, wobei eine Schichtung entstehen kann. Dies geschieht allerdings nur, wenn man den heißen Espresso schnell genug zur Milch gibt. Für das verwendete Modellsystem aus zwei Salzlösungen mit verschiedener Dichte fanden die Wissenschaftler einen Wert von rund 0,2 m/s. Erst ab dieser Geschwindigkeit schafft es der heiße, leichtere Espresso, genügend tief unter die schwerere Milch zu fließen. Diese Schichtung ist jedoch instabil (**Infokasten**): Es kommt zum Wettstreit zwischen der dichtegetriebenen Auftriebskraft in vertikaler Richtung und dem Temperaturgradienten in horizontaler

Richtung, der durch die Abkühlung des Getränks vom Rand des Glases her entsteht. Einerseits will die abkühlende Flüssigkeit am Rand nach unten sinken, andererseits will die leichtere Flüssigkeit weiter unten mit ihrer hohen Espresso-Konzentration aufsteigen. Das System löst diesen Konflikt durch eine Seitwärtsströmung auf, welche die kältere Flüssigkeit von außen nach innen transportiert: Daher entstehen sog. Konvektionsrollen in horizontalen Schichten, in denen die Flüssigkeit gut gemischt ist. Die horizontale Schichtung kann viele Stunden anhalten (**Abb. 1a**). Die Stabilität der Konvektionsrollen bestimmt dabei die Dicke der Schichten: Werden die Konvektionsrollen zu hoch und stark, zerfallen sie in vertikaler Richtung in zwei kleinere. Numerische Simulationen bestätigen dieses Szenario (**Abb. 1b**).

Die außergewöhnliche Stabilität der Schichtung erklärt sich dadurch, dass die molekulare Diffusion rund tausendmal langsamer ist als die thermische Diffusion. Die Situation ähnelt der im tropischen Ozean [8]: Auch dort gibt es den auftriebsgetriebenen Wettstreit zweier skalarer Felder mit unterschiedlichen Diffusionskonstanten, nämlich der Salzkonzentration und

DIFFUSION IM WETTSTREIT

Der Wettstreit zwischen der horizontalen thermischen Diffusion und der vertikalen Massendiffusion wird – wie in der Hydrodynamik üblich – durch einen dimensionslosen Parameter beschrieben. Diesen kann man als verallgemeinerte Rayleigh-Zahl Ra ansehen, wie sie aus der reinen thermischen Konvektion zwischen einer heißen unteren Platte und einer kalten oberen bekannt ist (Rayleigh-Bénard-Konvektion [6]). Dort ist die Rayleigh-Zahl $Ra = g \Delta T L^3 / (\nu \kappa)$, wobei ΔT der Temperaturunterschied zwischen den Plat-

ten ist, L ihr Abstand, g die Erdbeschleunigung, α der thermische Expansionskoeffizient, ν die kinematische Viskosität und κ die thermische Diffusivität. Hier jedoch ist L durch $\alpha \Delta T \rho_w / (-dp/dz)$ zu ersetzen [7], wobei $(-dp/dz)/\rho_w$ der normierte Salzkonzentrationsgradient ist. Dieser nimmt mit zunehmender Injektionstiefe des Espressos – also zunehmender Injektionsgeschwindigkeit – ab. Dadurch wird Ra größer, bis die konvektive Instabilität entsteht, die sich in den Konvektionsrollen ausdrückt.

der Temperatur. Im Ozean sorgt die Verdunstung an der Oberfläche für eine hohe Salzkonzentration: Das salzigere, schwerere Wasser sinkt nach unten, und Konvektionsrollen entstehen. Andererseits ist die Temperaturschichtung stabil, da das Wasser an der Oberfläche wärmer und damit leichter ist. Auch hier – bei der doppelten diffusiven Konvektion bzw. der thermohalinen Konvektion [9] – resultiert eine horizontale Schichtung von Wasser mit etwa konstanter Temperatur und großen Temperatursprüngen zwischen den Schichten. Diese Situation hat manch einer vielleicht schon beim Baden im Meer erfühlt.

Wer die Experimente mit Kaffee, Whisky, Ouzo oder Latte Macchiato als Spielerei abtut, irrt gewaltig: Einerseits lernen wir von diesen Prozessen wichtige Physik, Chemie oder Materialkunde mit vielen möglichen Anwendungen. So schlagen Howard Stone und Kollegen vor, die von ihnen untersuchte Methode – die schnelle

Injektion einer leichten Flüssigkeit in eine schwere – zu nutzen, um weiche Materialien in der Produktion so zu schichten, dass sich die Eigenschaften stufenweise ändern. Andererseits sind die Entschlüsselungen dieser alltäglichen Phänomene Beispiele *par excellance* für die Herangehensweise des Physikers: ein beobachtetes Phänomen in ein sauberes Experiment mit wohldefinierten Kontrollparametern übersetzen, genaue Beobachtungen ausführen und Daten aufnehmen, eine Theorie und ein Modell entwickeln, diese durch Berechnungen und numerische Simulationen bestätigen und schließlich Voraussagen machen, wie sich das System unter anderen Kontrollparametern verhält.

Sich mit der Fluidphysik dieser alltäglichen Systeme zu beschäftigen, eignet sich daher vorzüglich für die Ausbildung von Physikstudierenden und Promovierenden. Eine solche Herangehensweise ist viel motivierender und breiter

angelegt als nur ein kleines Rädchen zu sein für ein spezielles Detail eines großen Ganzen.

Detlef Lohse

Prof. Dr. Detlef Lohse, Physics of Fluids, Max-Planck Center Twente for Complex Fluid Dynamics, Department of Science and Technology, University of Twente

- [1] R. D. Deegan et al., *Nature* **389**, 827 (1997)
- [2] H. Tan et al., *PNAS* **113**, 8642 (2016).
- [3] D. Lohse, *Physik Journal*, Februar 2017, S. 29
- [4] H. Kim et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 124501 (2016).
- [5] N. Xue et al., *Nat. Commun.* **8**, 1960 (2017)
- [6] G. Ahlers, S. Grossmann und D. Lohse, *Physik Journal*, Februar 2002, S. 31
- [7] C. F. Chen et al., *Int. J. Heat Mass Transf.* **14**, 57 (1971)
- [8] A. von der Heydt, *Physik Journal*, November 2011, S. 23
- [9] R. W. Schmitt, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **26**, 255 (1994); T. Radko, *Double-diffusive convection*, Cambridge University Press, Cambridge (2013); M. Kellner und A. Tilgner, *Phys. Fluids* **26**, 094103 (2014); Y. Yang, R. Verzicco und D. Lohse, *PNAS* **113**, 69 (2016)