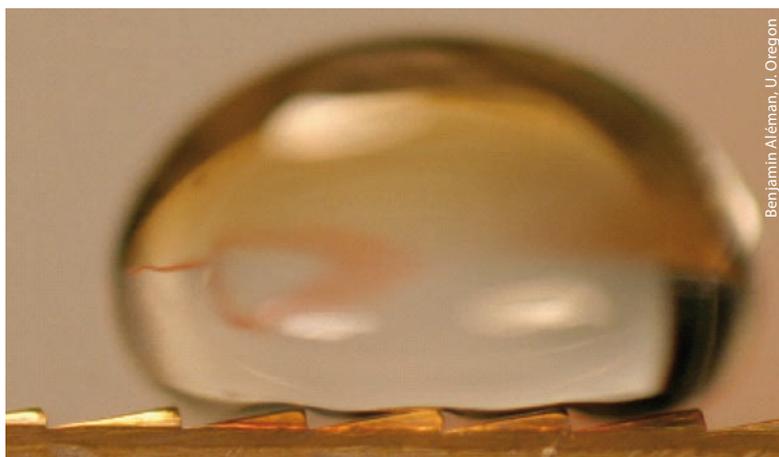


## ■ Reibungslos klettern

An einem schrägen Glasdach herunter laufende Regentropfen sind ein vertrautes Bild – doch es geht auch anders herum!

Experimente, in denen sich Tröpfchen „von alleine“ und sogar bergauf bewegen, gibt es schon seit geraumer Zeit. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um einen Tropfen in nässendem Kontakt mit einer festen Oberfläche, und die Treibkraft besteht aus einem Ungleichgewicht in Oberflächenenergien, so genannten Marangoni-Effekten: Hat der Tropfen auf einer „Hemisphäre“ eine geringere Oberflächenenergie als auf seiner anderen, dann setzen Flüssigkeitsströme ein, die den Tropfen in Richtung geringerer Gesamtenergie transportieren [1]. In dem vielleicht bekanntesten Beispiel ist die fragile Oberfläche so präpariert, dass sie sich graduell von hydrophob zu hydrophil ändert [2]. Dadurch können Wassertropfen bis zu 15 Grad bergauf laufen, über eine Strecke von typisch einem Zentimeter und mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 bis 2 mm/s. Ähnliche Marangoni-Effekte lassen sich auch mit thermischen oder elektrischen Gradienten erzielen, die ebenfalls Einfluss auf die Oberflächenenergie des Tropfens nehmen.

2006 entdeckten wir einen Effekt, der anscheinend grundsätzlich anders funktioniert, da das Objekt nicht mit dem Untergrund in direktem Kontakt steht, sondern auf einem Dampfkeissen schwebt: Das Phänomen der „tanzenden“ Tröpfchen auf einer heißen Herdplatte beschrieb Johann Gottlieb Leidenfrost bereits 1756 in Duisburg. 250 Jahre später verwendeten wir



Benjamin Aléman, U. Oregon

Abb. 1 Auf einer heißen Oberfläche gleiten Tröpfchen reibungsfrei auf einem Dampfkeissen. Hat der Untergrund die Struktur einer Ratsche, setzt sich der

Tropfen gegen den Strich der Ratsche in Bewegung; in dieser Aufnahme also nach links.

eine Platte mit sägezahnförmigen Rillen – eine Ratschenoberfläche (Abb. 1). Es zeigte sich, dass sich ein Tröpfchen auf seinem Dampfkeissen zielstrebig gegen den Strich der Ratsche bewegt [3]. Dabei ergeben sich Beschleunigungen bis zu  $2 \text{ m/s}^2$  und Endgeschwindigkeiten um  $5 \text{ cm/s}$ , wesentlich schneller also als benetzende Tropfen, die die Reibung mit ihrem Untergrund bremst. Da die Tropfen über eine „beliebig lange“ Ratsche gleiten, dauert die Bewegung im Prinzip so lange an, bis der Tropfen verdampft ist – bis zu einem Meter.

Beim Vortrieb eines Leidenfrost-Tröpfchens könnten Marangoni-Effekte aber dennoch eine Rolle spielen. Denn es ist durchaus wahrscheinlich, dass erhebliche Temperaturunterschiede innerhalb des Tröpfchens auftreten, die dann

zu Marangoni-Strömungen führen. Unklar ist jedoch, wie ein Impulsaustausch stattfinden kann, denn zwischen Leidenfrost-Tröpfchen und der heißen Oberfläche besteht praktisch keine Reibung, wie man leicht mit einer heißen Pfanne und ein paar Wasserspritzern nachvollziehen kann. Die Situation ist also ähnlich einem Auto auf spiegelglattem Eis: Nur weil die Räder sich drehen, heißt das noch lange nicht, dass es beschleunigt.

Die Gruppe von David Quéré an der École Polytechnique in Palaiseau bei Paris hat nun eindeutig gezeigt, dass Marangoni-Effekte zumindest nicht notwendig sind, um die Beschleunigung zu erklären. Den Autoren gelang es, einen Festkörper, in dem kein Marangoni-Fluss stattfinden kann, auf einer Ratsche in Bewegung zu setzen [4]. Dazu benutzten sie kleine Stückchen Trockeneis, die über einer erhitzten Oberfläche stark genug sublimieren, um den Leidenfrost-Effekt zu zeigen: Die Eiswürfelchen schweben auf einem Dampfkeissen und beschleunigen in dieselbe Richtung wie flüssige Leidenfrost-Tröpfchen. Die Erklärungsversuche konzentrieren sich auf die Strömung des Dampfes, der unter dem Tropfen entweicht. Das leuchtet ein, denn der Dampfdruck ist ja

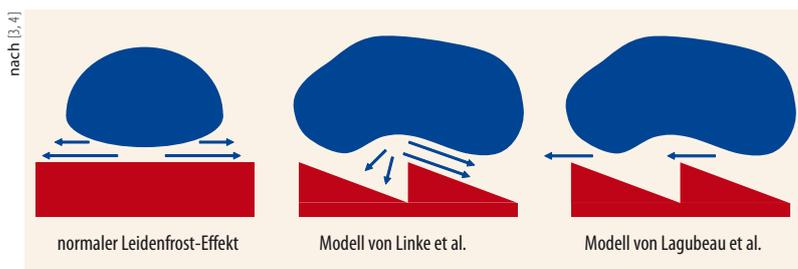


Abb. 2 Der „normale Leidenfrost-Effekt“ lässt ein Tröpfchen schweben (links). Hat die Oberfläche ein Sägezahnprofil, wirkt sich dies auf den Gasfluss aus. Unklar ist,

ob bei diesem die Vorwärts- oder die Rückwärtsrichtung überwiegt und was genau zur Beschleunigung des Tröpfchens führt (Mitte und rechts).

nachweislich groß genug, um das Gewicht des Tropfens zu tragen; eine teilweise seitlich gerichtete Kraft aufgrund des Dampfes könnte also durchaus die beobachtete Beschleunigung von etwa  $0,2\text{ g}$  erklären. Nur – wie wirkt diese Kraft auf den Tropfen?

Bisher gingen wir davon aus, dass die ratschenförmige Oberfläche den Dampfstrom teilweise nach vorne richtet (in die Vorzugsrichtung der Tropfenbewegung), und dass viskose Reibung zwischen Dampf und Tropfen zu einem Vortrieb führt [3]. Das Tröpfchen treibt also ein bisschen wie ein Papierschiffchen auf einem Fluss (Abb. 2). Filmaufnahmen stützen dieses Modell, sie zeigen, wie Dampf vor der Front des Tropfens nach vorne bläst.<sup>9)</sup> Fotos der Deformierung der Tropfen lassen Rückschlüsse auf die Druckverteilung in der Dampfschicht zu [3]. Lagubeau et al. legen dagegen nun Daten vor, die zeigen, dass der Dampfstrom oberhalb eines Ratschenzahnes nach hinten geht [4]. Entsprechend haben die

Autoren ein neues Modell ausgearbeitet, demzufolge die Ratsche den Dampfstrom teilweise nach hinten richtet, worauf die resultierende Reaktionskraft, wie beim Raketenantrieb, den Tropfen nach vorne treibt. Allerdings bleibt ungeklärt, wie in diesem Modell der Impulsaustausch zwischen Dampf und Tropfen stattfindet. Denn wenn es die Ratsche ist, die den Dampfstrom nach hinten richtet, dann sollte sie den entsprechenden Impuls aufnehmen, und nicht der Tropfen. Man müsste also einen Mechanismus finden, der den Dampf schon in einer Vorzugsrichtung aus dem Tropfen strömen lässt, und das ist bisher nicht gelungen.

Um Fortschritte zu machen, ist es nötig, die Dampfströmungen unter den Tropfen genau zu kartieren, was wegen der schnellen Bewegungen und der geringen Dicke der Dampfschicht nicht einfach ist. Lagubeau et al. berichten aber auch von einer neuen Variante dieses Effektes, die es möglicherweise etwas einfacher macht, ihn zu

untersuchen. Sie prägen der Unterseite eines Stücks Trockeneis eine Ratschenform auf, und tatsächlich, es bewegt sich ebenfalls, selbst auf einer ebenen, heißen Oberfläche. In dieser Anordnung ist der bewegte Körper selbst eine Ratsche, und es ist leichter, sich einen Impulsübertrag vorzustellen. Eine Analyse des Dampfstromes unter dem Leidenfrost-Festkörper könnte weiterhelfen.

Im Augenblick gibt es also noch keine eindeutige Erklärung für das Phänomen der rasenden Leidenfrost-Tröpfchen. Aber es ist allemal spannend, sie zu beobachten – denn obwohl sie praktisch keine Reibung haben, schaffen sie es sogar, bergauf zu klettern.

Heiner Linke

- [1] C. Marangoni, Annalen der Physik und Chemie **22**, 337 (1871)
- [2] M. K. Chaudhury und G. M. Whitesides, Science **256**, 1539 (1992)
- [3] H. Linke et al., Physical Review Letters **96**, 154502 (2006)
- [4] G. Lagubeau et al., Nature Physics **5**, 1 (2011)

#) <http://darkwing.uoregon.edu/~linke/droplet-movies/Movie7.mov>

Prof. Dr. Heiner Linke, The Nanometer Structure Consortium, Lunds Universitet, Box 118, 221 00 Lund, Schweden

## DIE ERDE ALS KARTOFFEL

Zwei Jahre nach dem Start des ESA-Satelliten GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) haben die beteiligten Wissenschaftler Ende März die bislang präzisesten Daten zum Erdschwerefeld vorgelegt. Dieses Geoid ist die Oberfläche eines hypothetischen, die gesamte Erde vollständig bedeckenden Weltozeans, der in Ruhe ist und dessen Form ausschließ-

lich die Schwerkraft festlegt. Das Geoid weicht um bis zu 100 Meter vom Rotationsellipsoid ab. Die in der „Kartoffel“ (unten) stark überhöhten Abweichungen korrelieren wenig mit der Topographie der Kontinente und der Meeresböden, stattdessen aber mit großskaligen Dichtestrukturen in Erdkruste und -mantel. GOCE verwendet erstmals die Methode der Gravitations-

gradiometrie und soll es u. a. erlauben, ein globales Höhensystem aufzubauen, sehr genaue Meereshöhen zu bestimmen, die Dichtestruktur von Kruste und Erdmantel besser zu verstehen und die globale Oberflächenzirkulation der Ozeane detailgenau aus dem Weltraum zu erfassen. (vgl. R. Rummel und A. Schlicht, Physik Journal, März 2010, S. 35)

