

■ Tröpfchen mit Airbag

Eine neue optische Messmethode offenbart den Einfluss des Luftdrucks beim Aufschlagen von Tröpfchen.

Bei Wassertropfen, die auf eine Windschutzscheibe prasseln, denkt man nicht sofort an ein physikalisches Experiment. Und doch offenbart sich dabei ein Prozess, der bei genauer Betrachtung erstaunlich komplex, von großer ästhetischer Schönheit sowie für zahlreiche Anwendungen relevant ist. Als erstes fällt einem der Tintenstrahldrucker ein, der im Hochleistungsbetrieb den Laserdruckern inzwischen weit überlegen ist. Das gilt für Kunstdruck und Kartenmaterial, aber auch für druckbare Solarzellen und das „rapid manufacturing“ durch dreidimensionales Drucken. Die zentrale Frage, die sich hier stellt: Wie gut kommt die Tröpfchenflüssigkeit mit der Oberfläche in Kontakt?

Die physikalischen Parameter, die das bestimmen, sind zunächst die Tropfengeschwindigkeit U , der Tropfendurchmesser d , die Oberflächenspannung γ , die kinematische Viskosität ν , die Dichte ρ_l und die Oberflächenbeschaffenheit. Eine sehr große Überraschung war es, als Sid Nagel und seine Kollegen aus Chicago im Jahr 2005 experimentell zeigen konnten, dass auch der Luftdruck eine entscheidende Rolle spielt [1].

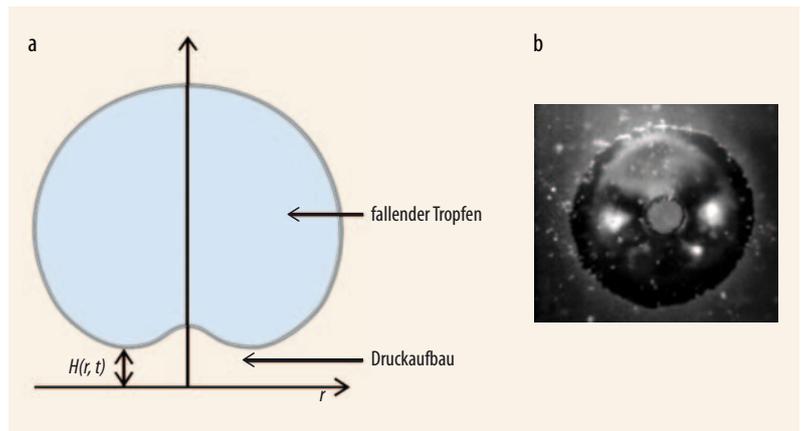


Abb. 1 In der letzten Phase vor dem Aufschlag führt der erhöhte Luftdruck unter einem fallenden Tropfen zu seiner Deform-

Unter bestimmten Bedingungen beobachteten sie, dass ein aufschlagender Tropfen unter Normaldruck (1 bar) zerspritzt, während er unter reduziertem Druck (etwa 0,2 bar) intakt blieb.

In den vergangenen Jahren haben weitere experimentelle und theoretische Arbeiten den Mechanismus für diesen Effekt ans Licht gebracht [2]: In den letzten Mikrometern vor dem Aufprall baut sich zwischen Tropfen und Oberfläche ein erhöhter Luftdruck auf, der den Tropfen deformiert (Abb. 1). Bei seinem Aufschlag auf einer Oberfläche entsteht dann eine kleine

Blase, die unter dem Mikroskop sichtbar ist und deren Entstehung sich mit Hochgeschwindigkeitsinterferometrie [3] oder sogar Hochgeschwindigkeitsfarbinterferometrie [4] verfolgen lässt. Gerade für Anwendungen ist es oft unerwünscht, wenn in der Mitte unter dem Tropfen kein direkter Kontakt zwischen Flüssigkeit und Oberfläche besteht (Abb. 1b).

Nun ist es einer Forschergruppe in Harvard um Michel Brenner, Dave Weitz und L. Mahadevan gelungen, die Gasschicht zwischen Tropfen und Oberfläche in der allerletzten Phase vor dem Aufprall zu visualisieren [5]. Dafür nützen sie eine in diesem Zusammenhang neue optische Messmethode, indem sie TIR-Mikroskopie (Total Internal Reflection) [6] mit einer neuartigen virtuellen Bildtechnik kombinieren. Damit erreichen sie eine räumliche Auflösung von einigen 10 Nanometern bei einer nichtsdestotrotz vorzüglichen Zeitauflösung im Mikrosekundenbereich (Abb. 2).

Auf diese Weise konnte das Harvard-Team zeigen, dass die kontaktlose Phase viel länger andauert als zunächst gedacht [5]: Die Flüssigkeit des Tropfens schlittert radial in alle Richtungen auf dem „Schmiermittel“ Luft weg und kommt so seitwärts viel weiter als beim Aufschlag im Vakuum. In der Endphase erreichen Flüssigkeit und Luft eine Geschwindigkeit von rund

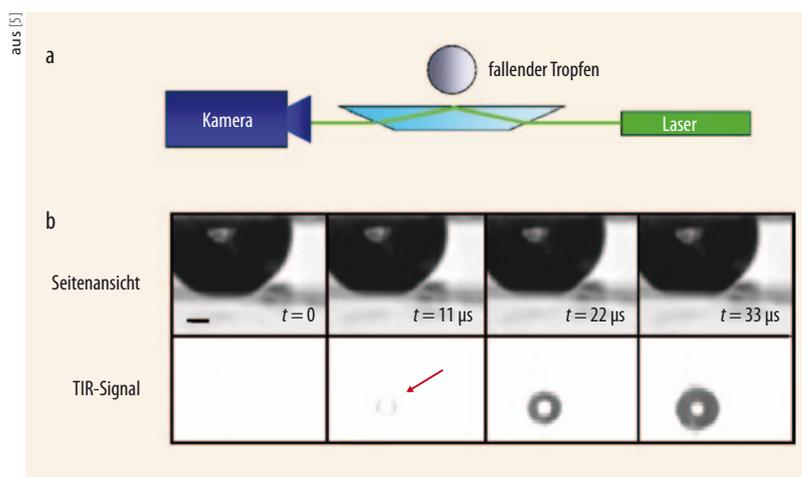


Abb. 2 Bei der TIR-Mikroskopie (a) werden die ersten Mikrometer-Bruchteile zwischen Oberfläche und Tropfen durch eine evaneszente Welle sichtbar gemacht. Diese entsteht nur, wenn das einfallende Laserlicht totalreflektiert wird. Zu sehen sind vier typische Bilder eines

2,6 mm großen Tropfens, der aus 21 cm Höhe auf eine Glasoberfläche fällt (b): Die obere Zeile zeigt die Seitenansicht, die untere Zeile die Ansicht von unten. Die eingeschlossene Blase ist deutlich zu erkennen. Der Längsbalken in der Seitenansicht bei $t=0$ entspricht $400 \mu\text{m}$.

1) vgl. K. Jacobs und S. Herminghaus, Strukturbildung in dünnen Filmen, Physikal. Blätter, Dezember 1999, S. 35

100 Metern pro Sekunde, sodass für letztere in einer quantitativen Analyse sogar Kompressibilitätseffekte wie eine Erwärmung zu berücksichtigen sind [7]. Der Grund für die hohen Geschwindigkeiten ist rein geometrisch: Die Öffnung zwischen der komprimierten Luftblase unter dem Tropfen und der Außenwelt schließt sich immer mehr, sodass bei gleichen Massenstrom die Geschwindigkeit immer weiter zunehmen muss. Die Luft reißt dabei die Flüssigkeit seitwärts mit.

Schließlich zerreißt im Allgemeinen auch der Luftfilm zwischen Tropfen und Oberfläche. Hier konnten die Forscher um Brenner, Weitz und Mahadevan beobachten, wie es zu einer Art „spinodalen“ Befeuchtung kommt [5], die gewissermaßen den inversen Prozess zur spinodalen Trocknung („spinodal dewetting“) darstellt [8], bei der ein Flüssigkeitsfilm aufgrund von Fluktuationen seiner Dicke spontan aufbricht.¹⁾ Nur wenn man die Oberfläche stark erhitzt, sodass Teile des einschlagenden Tropfens sofort verdampfen und der Tropfen auf seinem eigenem Dampf schwebt (Leidenfrost-Effekt), lässt sich der direkte Kontakt zwischen Flüssigkeit und Oberfläche vermeiden [9]. Der Tropfen tanzt dann auf einer dünnen Dampfschicht. Da diese schlecht thermisch leitet, kann es

sehr lange dauern, bis der Tropfen endgültig verdampft ist.

Die neuen Methoden und Ergebnisse werden ohne Zweifel eine Fülle neuer Experimente und Berechnungen nach sich ziehen – wunderbare Physik des Alltags mit großer Relevanz für vielfältige Anwendungen. Diese liegen nicht nur im Bereich der Drucktechnik, sondern auch in der Mikroelektronik, wo das Kühlen durch Spray, das Reinigen von Mikrostrukturen mit einschlagenden Tropfen und Immersionslithographie von Interesse, sondern auch in der Textilbranche, wo man an wasserabweisenden Materialien interessiert ist.

Detlef Lohse

- [1] *L. Xu et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 184505 (2005)
- [2] *S. Mandre et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 134502 (2009); *P. D. Hicks und R. Purvis*, J. Fluid Mech. **649**, 135 (2010)
- [3] *M. M. Driscoll und S. R. Nagel*, Phys. Rev. Lett. **107**, 154502 (2011)
- [4] *R. C. A. van der Veen et al.*, Phys. Rev. E **85**, 026315 (2012)
- [5] *J. M. Kolinski et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 074503 (2012)
- [6] *S. Rubinstein et al.*, Nature **430**, 1005 (2004)
- [7] *M. Mani et al.*, J. Fluid Mech. **647**, 163 (2010)
- [8] *S. Herminghaus et al.*, Science **282**, 916 (1998)
- [9] *T. Tran et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 036101 (2012)

KURZGEFASST

■ GPS umzingelt Planck-Konstante

Autofahrer finden dank GPS den rechten Weg. Nun haben Wissenschaftler der California State University das Navigationssystem genutzt, um eine obere Grenze für die Variation der Planck-Konstante h anzugeben. Das GPS nutzt Atomuhren, deren Frequenz von h abhängt. Aufgrund relativistischer Effekte ändert sich diese Frequenz für eine Uhr an Bord eines GPS-Satelliten gegenüber Uhren auf der Erde. Daher sendet das GPS ein entsprechend korrigiertes Signal. Die Wissenschaftler haben festgestellt, dass die korrigierten Daten über relativistische Korrekturen hinaus von dem Abstand des Satelliten zur Erde abhängen – eine mögliche Erklärung dafür ist eine ortsabhängige Planck-Konstante.

J. Kentosh und M. Mohageg, Phys. Rev. Lett. **108**, 110801 (2012)

■ Paar aus Neutronen aufgespürt?

Wissenschaftler der Michigan State University behaupten, erstmals Paare gebundener Neutronen, sog. Dineutronen, gesehen zu haben. Dazu haben sie ein einzelnes Proton aus einem Bor-17-Atom entfernt. Das entstehende Beryllium-16 zerfällt sofort und emittiert zwei Neutronen. Die Wissenschaftler haben berechnet, dass die zwei Neutronen stets in die gleiche Richtung emittiert wurden und schließen daraus, dass sie einen gebundenen Zustand, ein Dineutron, bilden. Andere Forscher sind allerdings skeptisch und deuten dies als Korrelation, die nicht weiter ungewöhnlich sei, da die beiden Neutronen bereits im Berylliumkern korreliert sind. Die Wissenschaftler aus Michigan wollen nun andere neutronenreiche Kerne untersuchen.

A. Spyrou et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 102501 (2012)