

## ■ Was tun, wenn die Teekanne tropft?

**Benetzungseigenschaften auf mikroskopischer Skala bestimmen das makroskopische Strömungsverhalten.**

Wer hat sich nicht schon geärgert über das schlechte Design des Ausgießers mancher ansonsten schick geformter Tee- oder Kaffeekanne? Egal wie man einschaut: Es tropft. Schon seit den 1950er-Jahren beschäftigen Physiker sich mit diesem alltäglichen Phänomen [1], das aber nicht nur die Sauberkeit von Tischdecken, sondern auch die Qualität industrieller Beschichtungsprozesse wie der sog. Vorhangbeschichtung wesentlich mitbestimmt. Eine Reihe allgemeiner Aspekte des Phänomens sind uns bereits aus dem Alltag wohl vertraut: Grundsätzlich haben wir es beim Ausgießen des Tees mit zwei verschiedenen Strömungsmustern zu tun: dem gewünschten, bei dem sich die Strömung vom Ausgießer ablöst und sich ein freier Strahl in die Tasse ergießt, und dem unerwünschten, bei dem der Tee stattdessen entlang der Kanne nach unten auf die Tischdecke läuft (Abb. 1). Eine französische Forschergruppe hat nun gezeigt, wie genau das Strömungsmuster von den mikroskopischen Eigenschaften der Kannenoberfläche abhängt [2].

Offensichtlich hängt das Strömungsmuster von der Geschwindigkeit ab. Mit Schwung einzugießen gelingt anfänglich, wenn die Tasse dann aber fast gefüllt ist und man die Fließgeschwindigkeit reduziert, tritt das unerwünschte



Abb. 1 So soll es nicht sein: Statt in einem freien Strahl von der Tülle in die

Tasse zu fließen, rinnt der Tee an der Kanne herab.

Strömungsmuster auf – und es tropft. Interessanterweise weist der Übergang eine dynamische Hysterese auf: Während sich die Strömung bei hohen Geschwindigkeiten stets vom Ausgießer ablöst und bei niedrigen stets daran haften bleibt, gibt es in der Nähe des Übergangs zumeist einen Bereich von Geschwindigkeiten, in denen beide Strömungsmuster stabil sein können. Dann bestimmt die Vorgeschichte, welches Strömungsmuster tatsächlich auftritt. Offensichtlich

hängen die Stabilitätsgrenzen der beiden konkurrierenden Strömungsmuster von der Geometrie und dem Benetzungsverhalten des Ausgießers ab. Ersteres lehnen die Erfahrung und der Vergleich verschiedener Teekannen, letzteres lässt sich durch Anbringen eines Streifens (hydrophoben) Tesafilms an der Außenseite der Tülle ebenfalls qualitativ verifizieren. Die entscheidende Frage bleibt: Wie lässt sich die Abhängigkeit quantitativ beschreiben?

Aus hydrodynamischer Sicht ist das Problem äußerst komplex. Seine Lösung bestimmt sowohl die Form der Flüssigkeitsoberfläche einschließlich der Position der Dreiphasenkontaktlinie, an der das Nass sich gegebenenfalls von der festen Wand ablöst, als auch das Strömungsfeld. Motiviert durch Anwendungen der Vorhangbeschichtung und der Prozesstechnologie von Polymerschmelzen haben Kistler und Scriven 1994 das Problem numerisch untersucht, und zwar für niedrige Reynolds-Zahlen  $Re$  und Weber-Zahlen  $We$  [3]. Da die Reynolds- und die Weber-Zahl

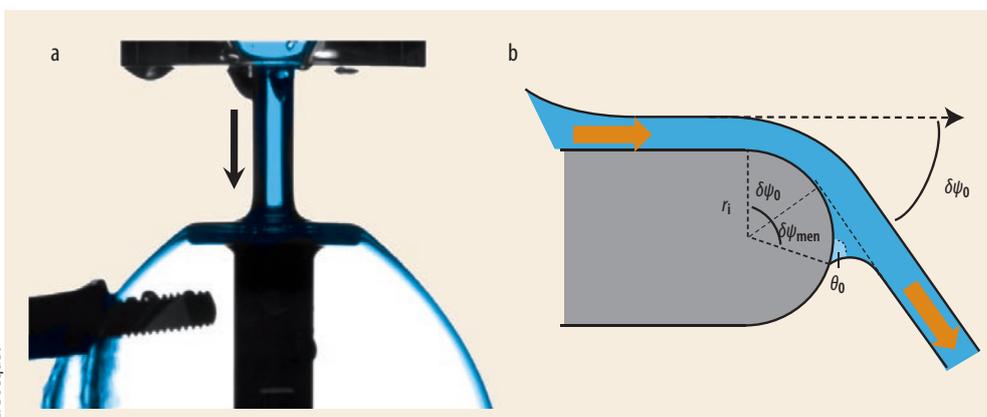


Abb. 2 Ein Stempel lenkt eine herabströmende Flüssigkeit um einen Winkel  $\delta\psi_0$  ab. Für die Frage, ob sich die Flüssigkeit ablöst oder nicht, ist die

Größe des Kapillarmeniskus an der Unterseite entscheidend.

die relative Bedeutung von Trägheit zu Viskosität bzw. Trägheit zu Oberflächenspannung angeben, überrascht es nicht, dass Viskosität und Oberflächenspannung in diesem Grenzfall eine wesentliche Rolle spielen.

Cyril Duez und Kollegen [2] widmen sich in ihrer aktuellen Arbeit dem für Wasser relevanteren Grenzfall großer Reynolds- und Weber-Zahlen ( $Re = 10^3 \dots 10^4$ ;  $We = 5 \dots 50$ ). Statt einer detaillierten numerischen Analyse führen sie Experimente zum Einfluss der entscheidenden physikalischen Parameter auf das Verhalten des Systems durch und entwickeln ein analytisches Modell.

Für ihre Versuche ersetzen die Autoren die Teekanne durch einen Stempel, der aus einer Scheibe mit einem abgerundetem Rand mit Krümmungsradius  $r_i$  besteht (Abb. 2). Ein Flüssigkeitsstrahl, der von oben auf den Stempel auftrifft, erzeugt einen wohl definierten, radial nach außen strömenden Flüssigkeitsfilm. Für Strömungsgeschwindigkeiten von ein bis fünf Meter pro Sekunde – vergleichbar dem Eingießen von Tee – bestimmen Duez et al. den Ablenkwinkel  $\delta\psi_0$  und insbesondere die kritische Geschwindigkeit, ab der die Strömung sich nicht mehr ablöst. Es zeigt sich, dass Stempel mit schärferen Kanten (kleine  $r_i$ ) die Flüssigkeit weniger stark ablenken als solche mit runderen.

Denn wenn ein Flüssigkeitsstrahl eine feste, gekrümmte Oberfläche tangential streift, lenken Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und Oberfläche den Strahl ab (Coanda-Effekt). Die resultierenden Zentrifugalkräfte führen zu einem Druckgradienten transversal zur Strömungsrichtung, dem Coanda-Druck  $\Delta P_c$ . Integriert man diesen über die von der Flüssigkeit benetzte Fläche, so ergibt sich die Gesamtkraft, die zur Ablenkung des Strahls führt. Duez et al. erweiterten dieses klassische Bild: Sie stellten fest, dass der sich ablösende Flüssigkeitsjet an seiner Unterseite über einen Kapillarmeniskus mit der Oberfläche verbunden sein muss (Abb. 2b). Der benetzte Winkel-

bereich vergrößert sich hierdurch um  $\delta\psi_{men}$  und hängt vom Youngschen Kontaktwinkel  $\theta_0$  zwischen Stempel und Meniskus ab. Dementsprechend ergibt sich auch die Gesamtkraft zwischen Flüssigkeit und Oberfläche und damit der resultierende Ablenkwinkel  $\delta\psi_0$  aus dem Kontaktwinkel. Aufgrund des Kapillarmeniskus' beeinflussen die Benetzungseigenschaften also trotz der hohen Weber-Zahl – gewissermaßen über die Hintertür – das makroskopische Strömungsverhalten.

Generell lenken Oberflächen mit kleinerem Kontaktwinkel die Flüssigkeit stärker ab als solche mit großen. Das leuchtet intuitiv ein: Ein kleinerer Kontaktwinkel ist Ausdruck einer stärkeren Adhäsion zwischen Flüssigkeit und Festkörper – und dadurch wird die Flüssigkeit länger am Stempel festgehalten. Für extrem wasserabweisende (superhydrophobe) Stempel ist  $\theta_0 \gg 90^\circ$  und die Ablenkung wird minimal. Die kritische Weber-Zahl für den Übergang zum „tropfenden“ Strömungsmuster ist dann selbst für Ausgießer mit größerem  $r_i$  nahe Null. Die Konsequenz: Superhydrophobe Teekannen tropfen nicht.

Die Abhängigkeit des Phänomens vom Kontaktwinkel lässt sich auch praktisch ausnutzen, um zwischen den verschiedenen dyna-

mischen Strömungszuständen aktiv zu schalten. Hierfür eignet sich besonders der Elektrobenetzungseffekt, der es erlaubt, den Kontaktwinkel leitfähiger Flüssigkeiten durch Anlegen einer Spannung auf geeigneten Oberflächen reversibel und quasi instantan um mehrere zig Grad zu reduzieren [4]. Dank dieser einzigartigen Eigenschaften findet die Elektrobenetzung in den vergangenen Jahren mehr und mehr Anwendungen auf den Gebieten der Mikrofluidik, der Optofluidik und in der Displaytechnologie. Duez et al. können durch Anlegen einer Spannung nicht nur den Ablenkwinkel sich ablösender Strömungen kontrollieren, sie können auch reversibel zwischen sich ablösenden und sich nicht ablösenden Strömungsmustern hin und her schalten. Das Anwendungspotenzial dieser neuen Methode – jenseits tropfender Teekannen – ließen sich die Autoren mit einem Patent absichern.

Frieder Mugele

- [1] M. Reiner, Phys. Today **9**, 16 (1956)
- [2] C. Duez, C. Ybert, C. Clanet und L. Bocquet, Phys. Rev. Lett. **104**, 084503 (2010)
- [3] S. F. Kistler und L.E. Scriven, J. Fluid Mech. **263**, 19 (1994)
- [4] F. Mugele und J. C. Baret, J. Phys. Cond. Matt. **17**, R705 (2005)

## DIE SONNE IN HD

Der im Februar gestartete NASA-Forschungssatellit Solar Dynamics Observators (SDO) ist das bislang leistungsfähigste Sonnenobservatorium und beobachtet sein Ziel mit  $4096 \times 4096$ -Pixel-CCDs. Damit erreicht er eine Bildfülle, die zehnmal besser ist als HDTV. Das stellt dieses bei einer Wellenlänge von 30,4 nm aufgenommene Bild einer eruptiven Protuberanz vom 30. März eindrucksvoll unter Beweis. Von seiner geosynchronen Umlaufbahn schickt SDO pro Tag 1,5 TeraByte zur Erde; das entspricht über einer halben Million MP3-Songs oder mehr als 200 Spielfilmen. Für diese Datenmenge benötigt er eine eigene Bodenstation. Die Mission ist auf fünf Jahre ausgelegt und soll helfen, das Verständnis für die aktiven Vorgängen auf der Sonne zu verbessern. Damit wären Forscher auch besser in der Lage, deren Auswirkungen auf Strahlungshaushalt, Klima und Magnetosphäre der Erde vorherzusagen.

