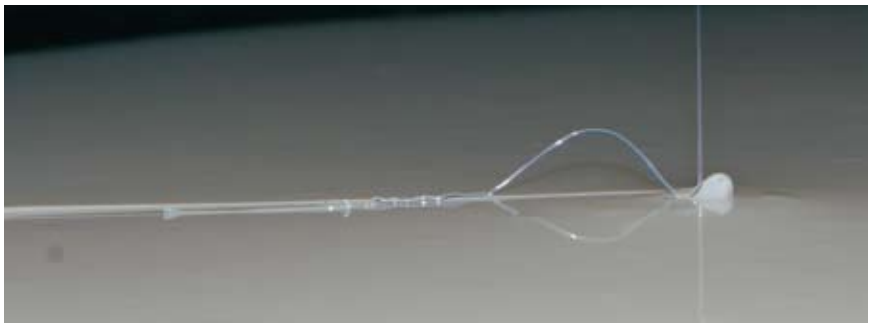
... etwas, das trotz aller Flüssigkeit in der Substanz eine Solidität in der Form erreicht.

Italo Calvino (1923–1985)



Wenn Shampoo Sprünge macht

Sobald bestimmte zähe Substanzen Scherkräften unterliegen, beginnen sie plötzlich, sich zu verflüssigen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Shampoo ist zum Haarewaschen da – denkt man zumindest. Doch kaum betrachtet man die Substanz mit ein wenig Neugier, beschert sie uns ein eindrucksvolles Phänomen, das sogar schon die physikalische Forschung auf den Plan gerufen hat. Ich selbst stieß zufällig darauf. Eines Tages drückte ich wieder einmal die zähflüssige Masse aus der Shampooflasche und ließ sie in einem dünnen Faden auf meinen Handteller fließen. Plötzlich schoss der Strahl in weitem Bogen von der Hand weg, obwohl es schien, dass er sich bereits mit dem entstandenen kleinen Haufen vereinigt hatte.

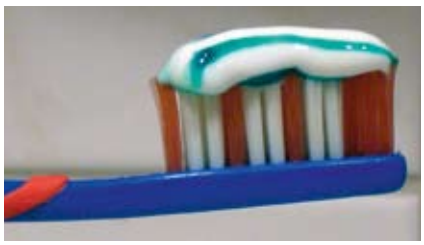
Zuvor hatte ich Shampoo für eine träge und zähe Substanz gehalten – ein solch agiles Verhalten hätte ich ihr nie zugetraut. Und doch lässt sich das Phänomen mit vielen Shampoos und flüssigen Seifen reproduzieren. Sorgen wir zuerst dafür, dass wir es in Ruhe beobachten können: Wir nehmen eine große Schale mit ebenem Boden und fixieren eine Spritze mit Shampoo etwa 20 Zentimeter darüber. Zu Beginn lässt das Haarwaschmittel ähnlich wie andere zähe Substanzen, Honig etwa oder Sirup, einen kleinen Flüssigkeits-»Berg« entstehen. Trifft der Strahl nicht genau die Spitze des Bergs, sondern seine Flanken, kommt es vor, dass er einen mehr oder weniger großen Sprung zur Seite macht und sich dabei sogar zu enormen Höhen aufzusteilen vermag. Offenbar bildet sich durch die Wucht des auftreffenden Strahls zunächst eine kleine Mulde in der vergleichsweise »festen« Substanz des ruhenden Shampoos.

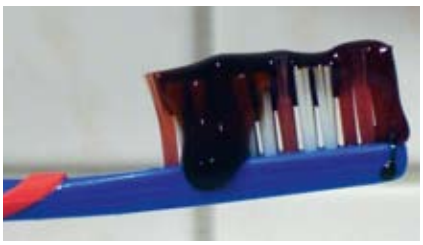
Mit dem fallenden Shampoo geht indessen Seltsames vor sich: Es lässt sich von den Muldenwänden umlenken und schießt als Flüssigkeitsjet scheinbar mühelos wieder in die Höhe. Dieser weist umso steiler nach oben, je tiefer die Mulde ist. Das Ergebnis erinnert an die unerwarteten Wasserfontänen beim Geschirrspülen, wenn ein starker Strahl aus dem Wasserhahn zufällig auf einen flachen Löffel oder auch in eine tiefe Kelle trifft.

Die Lebensdauer des Shampoojets ist jedoch nur kurz. Denn der viskose Haufen und damit die Rampe, von welcher der Jet abhebt, läuft binnen weniger Sekunden auseinander. Doch kaum ist der Jet unterbrochen, lässt das von oben nachfließende Shampoo einen neuen Haufen anwachsen, der wiederum als Abschussrampe fungieren kann, und so weiter.

Ein genauer Blick zeigt, dass der Shampoostrahl beim Gang durch die Mulde dicker wird (oben). Weil er keine Substanz verloren hat, kann das nur bedeuten, dass er an Geschwindigkeit eingebüßt hat: Offenbar gibt er einen Teil seiner Bewegungsenergie als Reibungsenergie an die Muldenwand ab. Diese so genannte Energiedissipation ist auch der Grund dafür, dass Jets erst ab einer bestimmten Fallhöhe auftreten. Ist die Höhe geringer, wird die Bewegungsenergie vollständig dissipiert – für einen Jet bleibt dann nichts übrig.

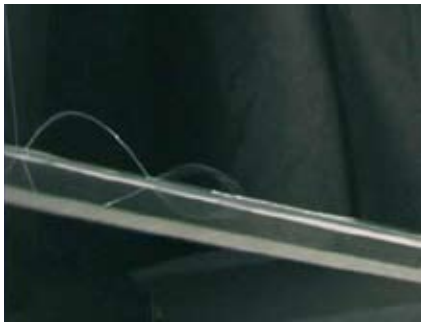
Aus diesem Sachverhalt könnte man umgekehrt schließen, dass die Shampoojets umso höher werden, je größer die Höhe ist, aus der die Flüssigkeit fällt. Doch weil mit der Fallhöhe die Bewegungsenergie des Strahls zunimmt, vertieft er die Mulde entsprechend. Damit

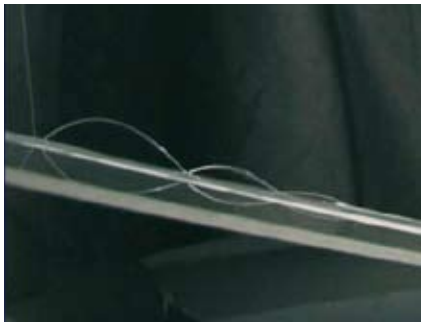




Auf der Bürste sollte Zahnkreme fest sein (links), im Mund jedoch eher sirupartig. Um beide Anforderungen zu erfüllen, muss die Pasta im Zuge des Geschehens ihre Viskosität ändern. Sonst würde sie bereits auf der Bürste verlaufen (rechts).

Gießt man Haarshampoo in eine flache Schale, wächst dort zunächst ein Flüssigkeitsberg. Erfährt nachfließendes Shampoo an dessen Flanken Scherkräfte, ändert es seine Viskosität. Dadurch kann es sich eine Mulde schaffen, aus der es als Flüssigkeitsjet emporschießt (links). Auf einer schiefen Ebene führt dies zu regelrechten Jetkaskaden (rechts). Kurzvideos zum Kayeeffekt auf www.spektrum.de/youtube.





ALLE FOTOS: STEFANIE STOCKMANN, INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNSTER

wächst aber auch die dissipierte Energie, denn schließlich verlängert sich die Strecke, entlang welcher der Strahl in Kontakt mit der Muldenwand tritt. Die Dissipation nimmt dabei offensichtlich schneller zu als die Bewegungsenergie. Es gehört zu den Grundprinzipien unserer physikalischen Welt, dass bremsende Kräfte immer mit höherer Potenz als beschleunigende Kräfte wachsen – sonst würden die Dinge stets weiter beschleunigt und kämen nie zur Ruhe. Aus diesem Grund kann der Jet eine (von den Umständen abhängige) maximale Höhe nicht überschreiten.

Ganze Kaskaden von Jetbögen

Über kurz oder lang, so zeigen die Beobachtungen ebenfalls, kommt der immer steiler aus der Mulde herausschießende Jet dem fallenden Flüssigkeitsstrahl ins Gehege. Das kann man aber verhindern. Neigt man die flache Unterlage und damit die Oberfläche des – wegen seiner großen Viskosität nur langsam herabrutschenden – Shampoos, verkleinert sich der Abschusswinkel gegenüber der Horizontalen. Weil der Jet nun mehr zur Seite als in die Höhe schießt und auch flacher wieder auf der Flüssigkeit auftrifft, entsteht eine entsprechend flachere Mulde, so dass die Energie zu einem weiteren Start ausreicht. Im günstigsten Fall entstehen ganze Kaskaden von Jetbögen schnell abnehmender Höhe (Fotos oben).

Beim Auftreffen auf einem Shampoohaufen, der auf ebener Fläche ruht, ist es der Zufall, der die Flugrichtung der Jets bestimmt. Bei geneigter Schale ist die Symmetrie jedoch gebrochen. Die entstehende Mulde ist nun asymmetrisch und besitzt auf ihrer »talwärts« gerichteten Seite geringere Höhe. Auf dieser Seite ist daher auch die Kontaktstrecke zwischen Flüssigkeitsstrahl und Wand minimal und damit die dissipierte Energie. Genau dies strebt die Natur an: die Rate zu minimieren, mit der Energie dissipiert wird. Und genau darum bewegen sich die Jets nun vorzugsweise talwärts.

Diese wie ein schönes Spiel erscheinenden Vorgänge sind auch Gegenstand ernsthafter physikalischer Forschung. Der britische Physiker Arthur Kaye war 1963 der Erste, der das nun nach ihm als Kayeeffekt benannte Phänomen beschrieb. 2006 klärte dann ein Team um Michel Versluis von der niederländischen Universität Twente die physikalischen Zusammenhänge genau auf.

Ursache des Kayeeffekts ist eine merkwürdige Eigenschaft des Shampoos: Anders als bei newtonschen Flüssigkeiten, die konstante Viskosität besitzen, ändert sich die Viskosität nichtnewtonscher Flüssigkeiten, sobald sie geschert werden, also eine seitliche Kraftwirkung erfahren. Im Fall des Shampoos wird die Viskosität durch die Scherung verringert. Die Flanken des Flüssigkeitsbergs verflüssigen den senkrecht fallenden Shampoostrahl also gewissermaßen, indem sie ihn seitlich beschleunigen. Der Haufen und damit die Muldenwandung behalten hingegen ihre »Härte«, sprich Viskosität, und lenken den flüssigen Strahl darum wirkungsvoll ab.

Dieses scherverdünnende Verhalten besitzen viele synthetische Flüssigkeiten: Sie sollen hohe Viskosität besitzen, solange man sie in Ruhe lässt, aber bei Scherung niedrige Viskosität annehmen. So soll Shampoo nicht von der Hand laufen, bevor man es in die Haare transportiert hat – sich aber dort leicht verteilen lassen. Farben sollen zunächst auf dem Pinsel haften – sich dann aber leicht auf der Wand verstreichen lassen (und trotzdem nicht gleich wieder herunterlaufen). Ähnliches gilt für Zahnpasta: Auf der Bürste soll sie fest sein, geschert durch die Zähne dann eher sirupartig.

Natürlich kann man all dies schlicht mit Blick auf die Nützlichkeit des Phänomens betrachten. Oder aber man sieht es in einem umfassenderen Kontext wie der Strömungsforscher Theodor Schwenk (1910–1986), der »das Flüssige« erlebte »als das Universelle, das noch nicht festgelegte Element, das aber fähig ist, sich von außen bestimmen zu lassen, als das Unbestimmte, aber Bestimmbare, als das ›sensible Chaos‹«.

DER AUTOR

H. Joachim Schlichting ist Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Kaye, A.: A Bouncing Liquid Stream. In: Nature 197, S. 1001–1002, 1963

Versluis, M. et al.: Leaping Shampoo and the Stable Kaye Effect. In: Journal of Statistical Mechanics, S. 07007, 20. Juli 2006