

► Polygonale hydraulische Sprünge

Oberflächenspannung führt zu Vieleck

Trifft ein Wasserstrahl auf dem Boden der Küchenspüle auf, so fließt das Wasser um den Punkt herum, an dem es auftrifft, zunächst schnell ab. In einem bestimmten Abstand steigt der Wasserpegel sprunghaft an, weil sich die Fließgeschwindigkeit verringert. Dieser sogenannte hydraulische Sprung kann, wenn der Spülenboden waagrecht und eben ist, sogar die Form eines exakten Kreises annehmen. Dass sich aus dieser Kreisform unter bestimmten Bedingungen allerdings auch Vielecke ausbilden, haben Forscher im Labor erst vor einigen Jahren entdeckt. Nun haben Wissenschaftler aus Deutschland, Dänemark und Japan erstmals ein theoretisches Modell entwickelt, das die grundlegenden Mechanismen dieses erstaunlichen Strömungsphänomens beschreibt.

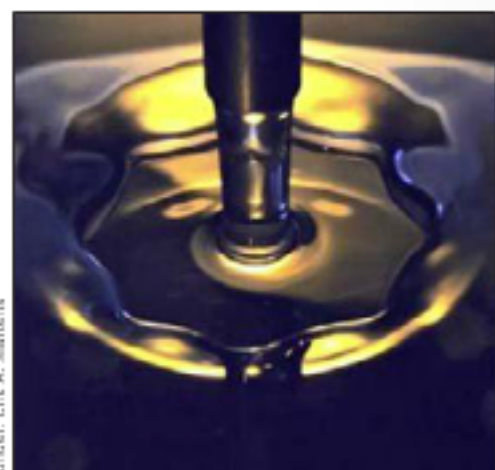


Bild 1. Polygonaler hydraulischer Sprung mit acht Ecken, entstanden beim Auftreffen eines Flüssigkeitsstrahls auf einen ebenen und waagerechten Boden.

Alltagsphysik beginnt oft an so unscheinbaren Orten wie der Küchenspüle. Von dort kennt wohl jeder folgendes Phänomen: Dreht man den Wasserhahn auf, bildet sich am Spülenboden um den Auftreffpunkt des Wasserstrahls eine kreisförmige Region mit einer dünnen Schicht sehr schnell fließenden Wassers. Am Rand dieser Region steigt der Wasserpegel sprunghaft an; jenseits fließt das Wasser langsamer weiter. Dieser Effekt wird als Wassersprung oder hydraulischer Sprung bezeichnet. Ist der Boden waagrecht und ganz eben, und verwendet man statt Wasser ein zähflüssigeres Fluid wie etwa Frostschutzmittel, so bildet sich dieser hydraulische Sprung sogar in Form eines exakten Kreises aus.

Wohl noch niemand hat jedoch in seiner Küchenspüle beobachtet, dass sich aus diesem Kreis beispielsweise auch ein Achteck herausbilden kann. 1997 haben Wissenschaftler dieses erstaunliche Phänomen

erstmals im Labor entdeckt: Sie haben bei Experimenten den Flüssigkeitspegel jenseits der Sprungstelle erhöht, indem sie den Flüssigkeitsstrahl auf eine runde Platte fließen liessen, die durch eine schmale Wand begrenzt wird. Die Höhe der Wand über der Platte können die Forscher vorstellen und so kontrollieren, wie hoch sich die Flüssigkeit jenseits des hydraulischen Sprungs aufbaut.

Regelmässige Dreiecke, Fünfecke oder auch Achtecke

Ab einem bestimmten Flüssigkeitspegel verliert der hydraulische Sprung seine Kreisform, es entwickeln sich Ecken und ein erstaunliches neues geometrisches Muster entsteht: ein regelmässiges Vieleck. Experten nennen dieses Phänomen polygonalen hydraulischen Sprung. In Abhängigkeit vom Pegelstand und der Flussgeschwindigkeit haben die Forscher zum Beispiel Dreiecke, Fünfecke oder eben Achtecke beobachtet – und festgestellt, dass bis zu 14 Ecken möglich sind.

Ein Modell für polygonale hydraulische Sprünge

Obwohl dieses Strömungsphänomen relativ einfach ist, gibt es bisher kein theoretisches Modell, das die experimentellen Beobachtungen exakt beschreibt. Nun haben Physiker des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen, der Technischen Universität von Dänemark und der Ibaraki Universität in Japan erstmals ein umfangreiches Modell für polygonale hydraulische Sprünge entwickelt.

Beim normalen kreisförmigen hydraulischen Sprung breitet sich die Flüssigkeit, wenn der Strahl auf den Boden auftrifft, zunächst mit einer Geschwindigkeit aus, die als superkritisch bezeichnet wird: Das Fluid bewegt sich schneller als sich darauf Störungen in Form von Oberflächenwellen fortpflanzen können; kleinere Störungen bewegen sich nur stromabwärts und klingen schnell aus.

Mit zunehmendem Abstand vom Auftreffpunkt des Strahls verringert sich die Fließgeschwindigkeit, und es kommt in Folge dessen in einem bestimmten Abstand zu

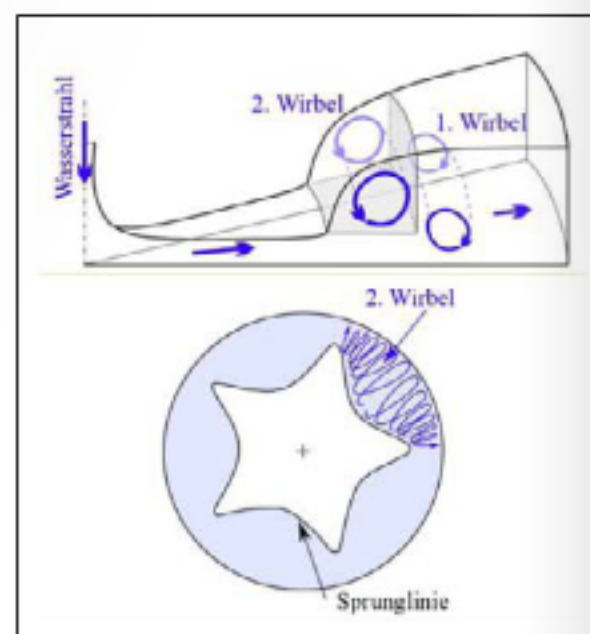


Bild 2. Wie ein polygonaler hydraulischer Sprung entsteht: Der normale hydraulische Sprung wird von einem hinter ihm liegenden ringförmigen Wirbel erzeugt, der sich im Uhrzeigersinn dreht. Ab einem gewissen Flüssigkeitsstand jenseits des Sprungs bildet sich ein zweiter Wirbel der darüber liegt und sich in entgegengesetzter Richtung dreht (oben). So können sich Vielecke bilden (unten).

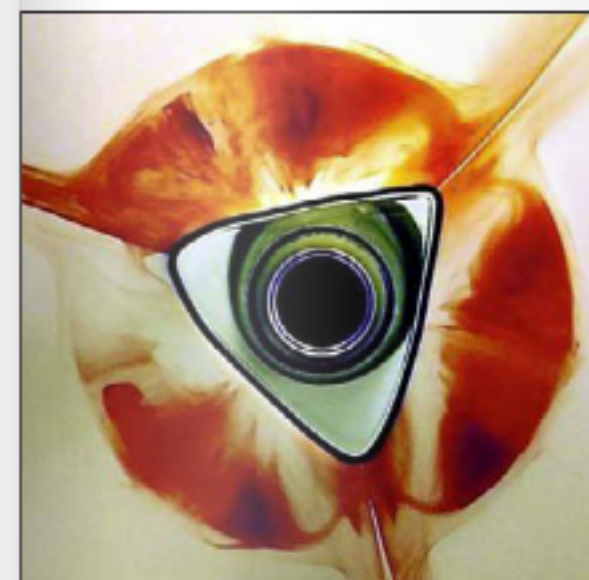


Bild 3. Ein dreieckiger hydraulischer Sprung von unten gesehen: In der Mitte trifft der Flüssigkeitsstrahl auf die Glasplatte. Roter Farbstoff macht den zweiten Wirbel sichtbar, der sich um den hydraulischen Sprung bildet und diesem seine eckige Form gibt. Der erste Wirbel, der den hydraulischen Sprung an sich erzeugt, ist nicht eingefärbt und daher nicht zu sehen.

einem plötzlichen Anstieg des Fluidpegels, also zum hydraulischen Sprung. Denn hinter dem Sprung entsteht ein Wirbel, der den hydraulischen Sprung wie ein Ring umgibt und sich wie eine ringförmige Walze im Uhrzeigersinn dreht. Die Strömungsgeschwindigkeit bezeichnen Experten nun als subkritisch: Störungen in Form von Wellen können sich in beide Richtungen ausbreiten.

Zwei gegeneinander drehende Wirbel erzeugen ein Vieleck

Wird der Fluidpegel nun über ein bestimmtes Mass erhöht, bildet sich über diesem Wirbel eine Gegenströmung aus, die einer Brandungswelle ähnlich ist. Die Flüssigkeit schwappt nach innen. Es entsteht eine zweite ringförmige Wirbel in Gegenrichtung zum ersten, darunter liegenden Wirbel. Hieraus kann sich nun ein Vieleck herausbilden.

In früheren Erklärungsansätzen versuchten Forscher die Bildung den hydraulischen Sprung nach der Bildung des zweiten Wirbels als Ergebnis des Wechselspiels zwischen der inneren Reibung, also der Viskosität, und der Schwerkraft des Wassers nach innen, also des hydraulischen Drucks, zu erklären. Warum sich dabei Polygone ent-

wickeln, konnte damit jedoch nicht beantwortet werden.

Einen weiteren Baustein lieferte der Effekt der Oberflächenspannung, also die Berücksichtigung der Bindungskräfte der Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche. Insbesondere stellten Wissenschaftler fest, dass der Mechanismus, der zu der Vieleckform führt, Ähnlichkeit mit der so genannten Rayleigh-Plateau-Instabilität hat.

Auch diese ist im Alltag leicht zu beobachten: Aus einem Hahn fließt ein dünner Wasserstrahl. Ab einer gewissen Strahllänge bricht dieser in eine Tropfenkette auf. Sie entsteht, weil Störungen, die im oberen Teil des Wasserstrahls zunächst nicht sichtbar sind, weiter unten von der Oberflächenspannung verstärkt werden – was schliesslich zum Aufbrechen des Strahls und zur Entstehung von Wassertropfen führt. Beim hydraulischen Sprung können, ähnlich wie in einem dünnen Wasserstrahl, kleine Störungen in der Form des kreisförmigen Wirbels durch die Oberflächenspannung des Fluids verstärkt werden, was schliesslich zur Ausbildung der Ecken führt.

Erklärung mit Druck, Viskosität und Oberflächenspannung

Das Modell der Forscher rund um Erik A. Martens vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation kombiniert nun die Aspekte der beiden früheren Erklärungsansätze: hydraulischer Druck, Viskosität und Oberflächenspannung. «Wir können damit die grundlegenden Mechanismen beschreiben, die zur Instabilität des kreisförmigen hydraulischen Sprungs und zur Ausprägung eines Vielecks führen», sagt Martens. Selbst wenn in einem vereinfachten Modell Effekte der Oberflächenspannung vernachlässigt werden, die wegen der starken Oberflächenverformung grundsätzlich wichtig ist, konnten die Wissenschaftler zeigen, dass sich die vieleckigen Strukturen gut reproduzieren lassen.

Das Strömungsprofil in einem polygonalen hydraulischen Sprung ist jedoch noch komplizierter. So entspringen an den Ecken eines Polygons sehr starke strahlartige Strömungen nach aussen. An dieser Stelle kommen die Forscher mit ihrem Ansatz jedoch an eine Grenze. «Um bessere Modelle für die komplizierten Polygonströmungen zu entwickeln, bräuchten wir noch

mehr experimentelle Kenntnisse über die Geschwindigkeits- und Höhenprofile der Vieleckmuster», sagt Martens. «Tatsächlich ist eines der Ziele unserer Arbeit, die Forschung auf diesem Gebiet weiter anzuknüpfen.»

Die Forscher können sich auch vorstellen, dass detailliertere Studien dieser Strömungsprozesse möglicherweise zur Beobachtung neuer, unerwarteter Phänomene führen könnten.

Quelle: Max-Planck-Gesellschaft

Originalpublikation

Erik A. Martens, Shinya Watanabe, Tomas Bohr, «Model for polygonal hydraulic jumps», Phys. Rev. E 85, 036316 (2012) [14 pages].

Kontakt

Erik A. Martens PhD
Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation
Am Fassberg 17
D-37077 Göttingen
Telefon +49 (0)551 5176 271
erik.martens@ds.mpg.de
www.ds.mpg.de

CT3 Texture Analyzer



BROOKFIELD
präsentiert:
Kit für Pharma- und Kosmetikindustrie

Hunter & Caprez AG
Farbmetrik, Viskosimetrie

CH-8126 Zumikon
Tel. 044 / 918 08 08
mail@huntercaprez.com
www.huntercaprez.com