

Oberflächliche Attraktionen

Naturphänomene, die sich der Minimierung der Oberfläche verdanken

H. J. Schlichting

*Vielleicht ist viel mehr an der Oberfläche
vielleicht ist alles falsch, was nicht Oberfläche ist?
Elias Canetti*

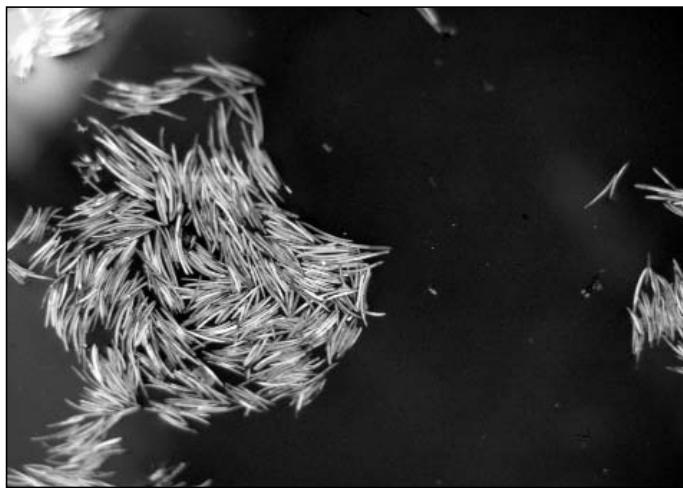


Abb. 1: Ein Tannennadelfloß auf der Oberfläche einer Wasserpütze

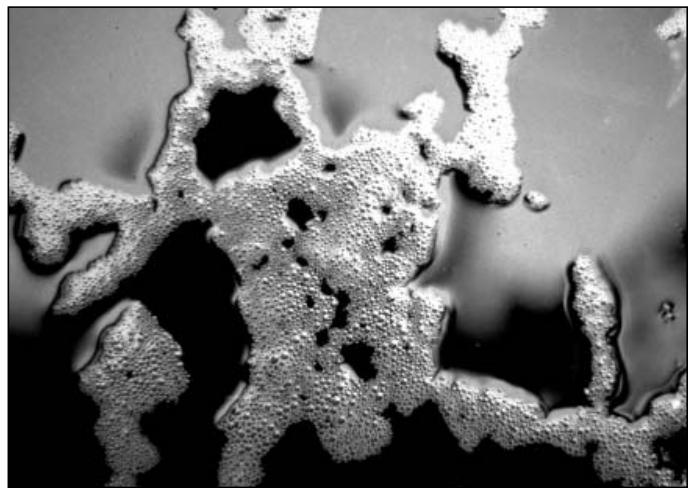
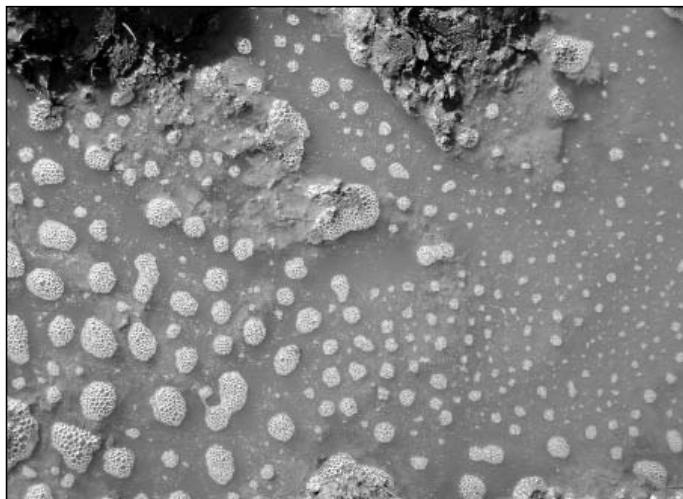


Abb. 2: Blasenfloß auf einer Wasseroberfläche nahe einem Wasserzulauf

Wenn Tannennadeln in eine Pfütze oder einen Teich fallen, wird man sie über kurz oder lang fein säuberlich gepackt in mehr oder weniger großen Flößen auf dem Wasser driften sehen. Kaum jemals trifft man einzelne Nadeln an, es sei denn, sie sind gerade hineingefallen und hatten noch keine Gelegenheit, sich einem Nadelfloß anzuschließen (Abb. 1).

Auch Blasen, die zum Beispiel entstehen, wenn aus einem Rohr Wasser in ein Becken strömt, vereinigen sich stets zu mehr oder weniger großen Blasenflossen. Bei der gegenseitigen Anziehung von Blasen bewegen sich die kleineren

Abb. 3: Blasen, die aufgrund von Faulprozessen entstehen und an die Oberfläche aufsteigen, finden sich zu mehr oder weniger großen Blasenflossen zusammen.



zu den größeren (Abb. 2). Manchmal beobachtet man, wie sich in einem Tümpel aufsteigende Faulgase direkt über der Entstehungsstelle in einem mit jeder zusätzlichen Blase wachsenden Floß versammeln. Kleinere Flöße vereinigen sich zu größeren und ziehen die aufsteigenden Blasen auch dann zu sich, wenn sie an einer etwas entfernteren Stelle die Wasseroberfläche erreichen (Abb. 3).

Wenn Blasen in einem kohlensäurehaltigen Getränk in der Nähe des Glasrandes an die Oberfläche gelangen, werden sie sich beeilen, an den Rand zu kommen, sofern sie nicht vorher geplatzt sind. Der Rand ist mit Blasen gesäumt. Wie kommt es zu diesem Anziehungsverhalten zwischen kleinen schwimmenden Gegenständen untereinander und zwischen Gegenständen und Gefäßrand?

Blasen steigen stets zur höchsten Stelle

Betrachten wir zunächst eine Blase, die in einer Flüssigkeit aufsteigt und an der Oberfläche ankommt. Sie wird anschaulich gesprochen durch die dichtere Flüssigkeit nach oben aus der Flüssigkeit hinausgedrängt. Dabei muss sie die Oberfläche durchqueren, was leichter gesagt ist als getan. Denn aufgrund der Oberflächenspannung verhält sich die Oberfläche wie eine elastische Membran. Die auftriebende Blase drückt gegen diese Membran und wölbt sie nach oben auf. Die Vergrößerung der Oberfläche macht sich in einer rücktreibenden Kraft bemerkbar, die die auftriebende Kraft kompensiert. Solange die Blase nicht platzt, wird sie weiter steigen, sofern sich die Möglichkeit

dazu bietet. Das ist der Fall, wenn sie beispielsweise in die Nähe einer zweiten Blase gerät, in deren Nähe sich die Flüssigkeitsoberfläche aufwölbt. Dadurch wird das Kräftegleichgewicht zwischen Auftriebskraft und rückwirkender „Oberflächenkraft“ gestört, weil letztere in Richtung des Anstiegs der Aufwölbung von der Senkrechten abweicht. Die rückwirkende Kraft in senkrechter Richtung wird etwas kleiner und erhält zusätzlich eine Komponente in Richtung des Anstiegs, was zu der beobachteten Annäherung der Blasen führt.

Der Wasserspiegel steigt aber nicht nur in der Nähe von Blasen an. Der Glasrand eines Trinkglasses ist ebenfalls von einem so genannten konkaven Meniskus umgeben. Auch dort hat die Blase eine Gelegenheit, höher zu steigen. Gasblasen werden vom Glasrand geradezu angezogen, wenn sie in den Einflussbereich des Meniskus geraten. Man kann sich den Vorgang grob veranschaulichen mit einem Héliumballon, der bis an die Zimmerdecke steigt. Weist die Decke eine Neigung auf, so bleibt er nicht an der Stelle „haften“, an der an die schräge Decke gerät, sondern steigt weiter hoch, wobei er sich zwangsläufig zur Seite bewegen muss.

Exkurs: Entropieerzeugung als Antrieb

Da die Oberflächen von Wasser und Glas jeweils eine Grenze mit der Luft bilden, spricht man allgemein von Grenzflächen. Die Ausbildung des Meniskus am Glasrand ist eine Folge der Vergrößerung der Grenzfläche zwischen Glas und Wasser. Für diese Grenzfläche ist offenbar weniger Grenzflächenenergie nötig als für die Grenzfläche zwischen Glas und Luft. Die Aufwölbung des Wassers und die dadurch bewirkte Vergrößerung der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft kommen erst dann zum Stillstand, wenn die damit verbundene Zunahme von potenzieller Energie und Grenzflächenenergie des Wassers so groß wird wie die durch die zunehmende Grenzfläche zwischen Luft und Glas dissipierte Energie.

Treibende „Kraft“ für den Vorgang der Ausbildung des Meniskus ist also die Minimierung der Grenzflächenenergie der Grenze zwischen Glas und Luft. Dahinter verbirgt sich der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, wonach das Gesamtsystem dem Zustand maximaler Entropie zustrebt. Die Gesamtentropie nimmt nämlich so lange zu, wie Oberflächenenergie bei Umgebungstemperatur an die Umgebung abgegeben und damit dissipiert wird [1].

„Experimentieren – ein Hervorbringen der Erscheinung“ (Friedrich Wilhelm Schelling)

Das attraktive Verhalten von leichten Gegenständen wie den Tannennadeln soll im Folgenden auf der Wasseroberfläche eines Trinkglasses näher untersucht werden. Als Ausgangspunkt dient ein schon früher beschriebenes Experiment, in dem eine kleine Korkkugel auf die Wasseroberfläche gelegt wird [2]. Sie bewegt sich erwartungsgemäß zum Rand des Glases und bleibt dort „hängen“ (Abb. 4a). Füllt man anschließend das Glas vorsichtig, bis sich das Wasser linsenförmig aufwölbt, so löst sich die Kugel vom nunmehr tiefer liegenden Rand und driftet bergauf zur höher liegenden Mitte der Wasseroberfläche (Abb. 4b).

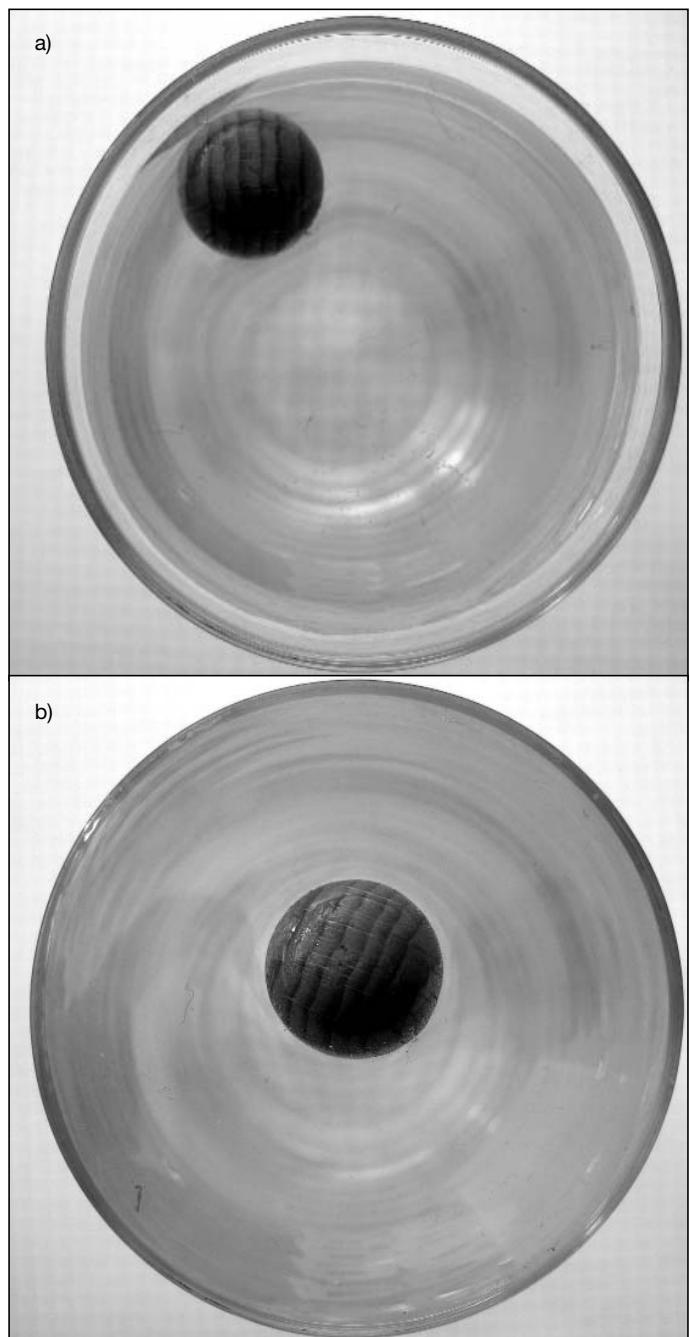
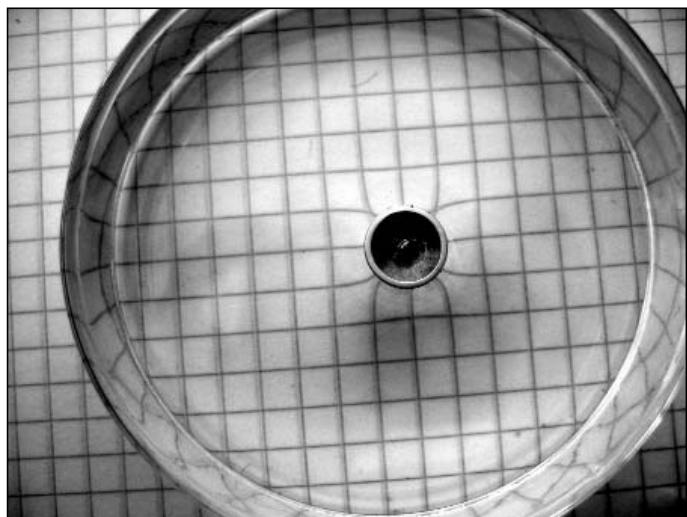
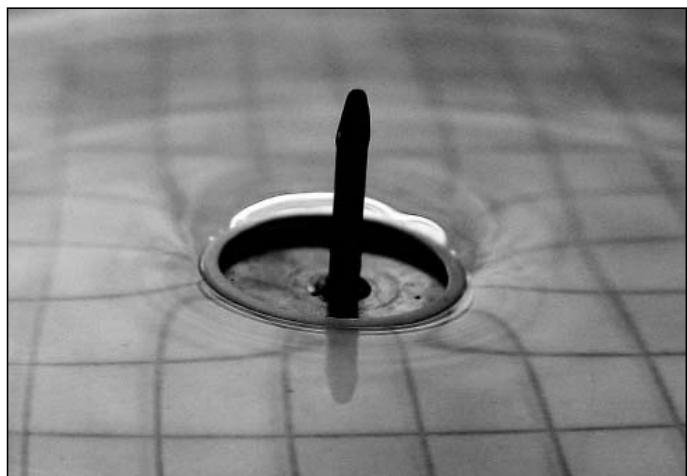
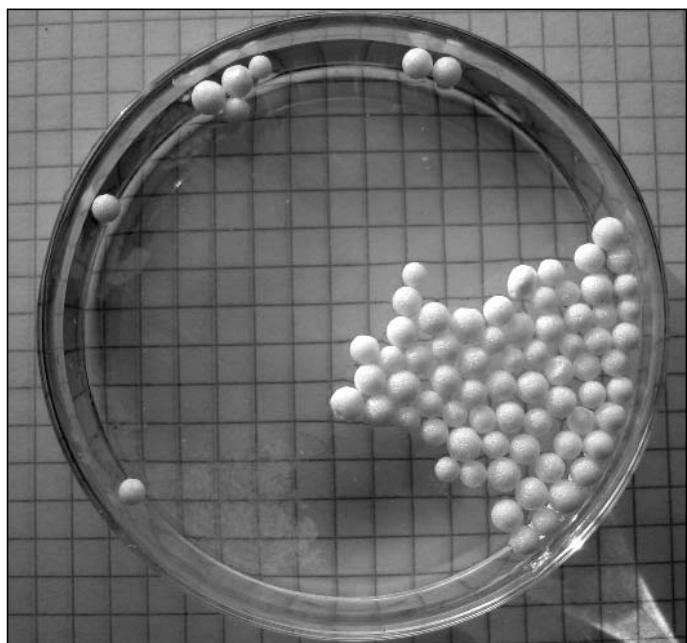


Abb. 4: Die Korkkugel driftet zum Randmeniskus (a) oder zur überhöhten Mitte (b).

Wenn die Korkkugel auf eine Wasseroberfläche gesetzt wird, sinkt sie so weit ein, bis die dadurch provozierte Auftriebskraft die Gewichtskraft kompensiert. Im Unterschied zu Blasen, (die das Wasser ganz verlassen würden, wenn die Oberflächenspannung sie nicht daran hinderte,) besteht auf den ersten Blick für die Kugel kein Anlass mehr, noch höher zu steigen, wenn sich die Gelegenheit dazu böte. Dass sie es trotzdem tut, ist der Oberflächenspannung zu verdanken: Da die Kugel von Wasser benetzt wird, steigt ein wenig Wasser an der Kugel hoch und bildet wie am Rand des Glasgefäßes einen konkaven Meniskus aus. Dadurch wird die benetzte Kugel ein wenig tiefer ins Wasser „gezogen“ als dem Kräftegleichgewicht zwischen Gewichts- und Auftriebskraft entsprechen würde.

Wir haben damit eine vergleichbare Situation wie bei den die Oberfläche aufwölbenden Blasen. Sobald die Korkkugel in die Nähe des konkaven Meniskus einer zweiten Kugel oder eines Gefäßrandes gerät, wird die rückwirken-



de Kraft der Oberfläche aus der Senkrechten verschoben. Dadurch wird das Kräftegleichgewicht ähnlich wie bei der Gasblase in der Weise gestört, dass die Kugel an der geneigten Oberfläche hoch gleitet. Man kann die Situation anschaulich gesehen mit einem schwimmenden Ball vergleichen, den man tiefer ins Wasser drückt. Wenn die Kraft infolge des Drückens nur etwas aus der Senkrechten abweicht, entwischen der Ball zur Seite, um eine höhere Lage einzunehmen.

Wie schon erwähnt, bilden sich solche Menisken am Glasrand und an den schwimmenden kleinen Gegenständen, die durch das Wasser benetzt werden. Bringt man beispielsweise nacheinander mehrere kleine Styroporkügelchen auf das Wasser, so bleiben sie nicht lange allein. Bei konkaver Wasseroberfläche bewegen sie sich zum Rand oder tun sich zu Kugelflößen zusammen. In kleinen Gefäßen, bei denen der Rand auch noch in der Mitte „spürbar“ ist, driften schließlich die Flöße zum Rand. Nur bei einer konvexen Wasseroberfläche versammeln sich alle Kugeln in der Mitte. Dabei stellt sich stets die „hexagonal dichteste Kugelpackung“ ein, weil auf diese Weise die Wasseroberfläche minimal wird. Die in Abb. 5 dargestellte Kugelkonfiguration ähnelt übrigens sehr stark der Blasenkonfiguration in Abb. 3.

Mit diesen experimentellen Ergebnissen wird die gegenseitige Anhänglichkeit der Tannennadeln verständlich: Die konkaven Menisken der einzelnen Nadeln ziehen sich an, sodass ein möglichst kleines Floß entsteht. Aufgrund der unterschiedlichen und länglichen Form der Nadeln kommt es teilweise zu Verhakungen, sodass sie sich meist nicht in der kleinstmöglichen Konfiguration zusammenfinden. Die abschnittsweise parallele Ausrichtung der Nadeln zeigt aber deutlich die Tendenz zur Minimierung an.

Als eine wesentliche Voraussetzung für die gegenseitige Anziehung kleiner schwimmender Objekte auf dem Wasser haben wir die Tatsache erkannt, dass sie aufgrund der Oberflächenspannung tiefer ins Wasser eintauchen als es dem Kräftegleichgewicht von Schwerkraft und Auftriebskraft entspräche. Dadurch wird die Frage nahe gelegt, wie sich kleine Objekte verhalten, die eine größere Dichte als das Wasser haben, sodass sie nicht allein durch die Auftriebskraft über Wasser gehalten werden können. Legt man beispielsweise eine Heftzwecke vorsichtig auf die Wasseroberfläche, so geht sie nur deshalb nicht unter, weil zusätzlich zur Auftriebskraft eine Art elastischer Rückstellkraft der oberflächengespannten „Wasserhaut“ wirksam wird.

Anders als die Gegenstände mit einer kleineren Dichte als Wasser, die durch einen konkaven Meniskus umgeben sind, dellen Heftzwecken die Wasseroberfläche ein und bilden einen konvexen Meniskus aus (Abb. 6). Darin kommt die Tatsache zum Ausdruck, dass die Schwerkraft größer ist als die Auftriebskraft. Nur dadurch, dass neben der Auftriebskraft die rückwirkende Kraft der eingedellten Oberfläche ins Spiel kommt, kann die Schwerkraft kompensiert werden. Durch einen konkaven Randmeniskus wird die rückwirkende Kraft aus der Senkrechten abgelenkt. In diesem Fall wird das Gleichgewicht zwischen den drei Kräften jedoch in der Weise gestört, dass die Heftzwecke die „schiefe Ebene“ des konvexen Meniskus hinuntergleitet – nicht anders, als man es von schweren Gegenständen erwartet. Sie landet demnach in der tiefer liegenden Mitte des Glases (Abb. 7). Auf der konvexen Oberfläche des überfüllten Glases driftet sie zum tiefer liegenden Rand. Dabei kann sie unter Umständen so schnell werden, dass sie über den Rand des Glases hinausschießt.

Abb. 5 (oben): Kleine Styroporkügelchen gleiten zum Randmeniskus und zu ihren eigenen Menisken, sodass es zu „hexagonal dichtesten Kugelpackungen“ kommt.

Abb. 6 (Mitte): Eine Heftzwecke „schwimmt“ trotz der größeren Dichte auf dem Wasser und driftet vom Randmeniskus weg zur tiefer gelegenen Mitte.

Abb. 7 (unten): Die Eindellung der „Wasserhaut“ ist durch die optische Verzerrung des unter das Wasserglas gelegten karierten Musters deutlich zu erkennen.

Kommen sich Heftzwecken auf der Wasseroberfläche nahe, so „fallen“ sie in ihre gegenseitigen Vertiefungen. Mit anderen Worten: Sie ziehen sich gegenseitig an. Viele Heftzwecken bilden daher dasselbe Muster eines hexagonal dicht gepackten Floßes, wie es bereits bei Blasen und Styroporkugeln beobachtet werden konnte, obwohl die Ursache gewissermaßen entgegengesetzter Natur ist.

Dieselbe abstoßende Wirkung wie der konkave Glasrand übt ein anderer schwimmender Gegenstand mit konkavem Meniskus aus. Bringt man eine Heftzwecke in die Nähe einer Styroporkugel, so stieben sie heftig auseinander. Dieses Verhalten wird verständlich, wenn man sich klarmacht, dass eine Annäherung beider die Vergrößerung der Wasseroberfläche zur Folge hätte.

Um den Einfluss der Dichte auf das Verhalten kleiner Objekte untersuchen zu können, benutzen wir Objekte mit der gleichen Oberflächenbeschaffenheit. Dazu eignen sich die Heftzwecken und ihre vorsichtig abgelösten Plastikkappen. Aufgrund ihrer Schiffform haben die Kappen eine geringere mittlere Dichte als Wasser und würden wie die Styroporkugeln auch auf völlig entspanntem Wasser schwimmen¹⁾. Deshalb werden die Kappen wie die Styroporkugeln heftig von den Heftzwecken abgestoßen (Abb. 8).

Offenbar spielt für Anziehung und Abstoßung die (mittlere) Dichte des auf dem Wasser driftenden Gegenstandes die entscheidende Rolle. Daher wird im folgenden Experiment eine von zwei aneinanderhängenden Kappen zunehmend mit Sand beladen, wodurch ihre Dichte schrittweise erhöht wird. Zunächst beobachtet man nur, dass die beladene Kappe immer tiefer ins Wasser eintaucht. Solange der obere Rand des Meniskus noch über der Wasseroberfläche ist, bleibt zumindest qualitativ gesehen alles beim Alten. In dem Moment aber, in dem der obere Rand des Meniskus das Niveau der Wasseroberfläche unterschreitet und der Meniskus von der konkaven in die konvexe Form übergeht, stößt sie die leere Kappe von sich und vereinigt sich stattdessen mit der bislang in sicherem Abstand befindlichen Heftzwecke (Abb. 9).

Bei dem Manöver, eine Heftzwecke vorsichtig neben eine bereits auf dem Wasser befindliche zu platzieren, macht man eine weitere interessante Beobachtung: Sobald sie die Wasseroberfläche berührt, entfernt sich die andere Heftzwecke, um in dem Moment wieder zurückzukehren, da die andere in ihrer konvexen Delle zur Ruhe gekommen ist. Andererseits zieht sie auf dem Wasser befindliche Plastikkappen an, solange sie nur wenig eingetaucht und von einem konkaven Meniskus umgeben ist (Abb. 10).

Auf ähnliche Weise lässt sich die Anhänglichkeit zweier aneinander haftenden Heftzwecken ruinieren. Man muss nur eine von ihnen vorsichtig an der Spitze anheben, bis sich der konvexe in einen konkaven Meniskus umstülpt. Dann findet sich die andere Heftzwecke unversehens auf einer schiefen Ebene wieder und gleitet an ihr hinab.

Das Anziehungs- und Abstoßungsverhalten der von einem konkaven und einem konvexen Meniskus umgebenen Objekte erinnert stark an das Verhalten von Magneten. Auch wenn die physikalischen Grundlagen völlig verschieden sind, können die mit Magneten oder driftenden Objekten gemachten Erfahrungen Anregungen zu analogen Experimenten in dem jeweils anderen Bereich geben. Ein Unterschied fällt jedoch sofort ins Auge. Anders als bei magne-

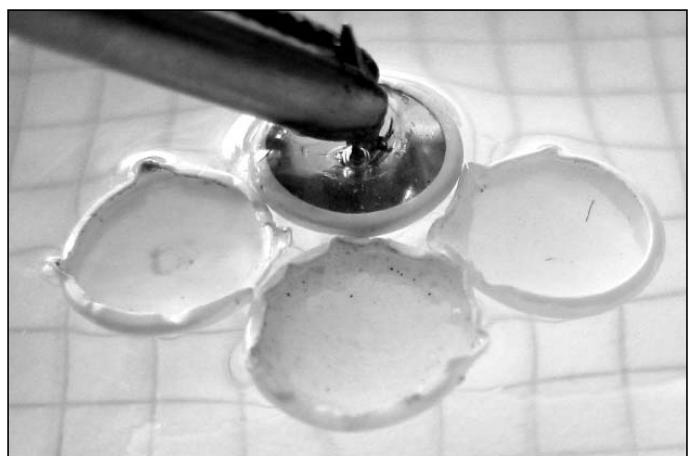
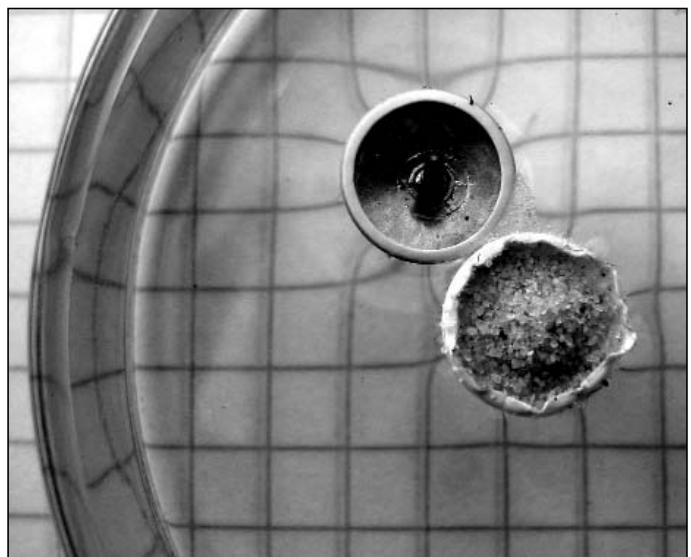
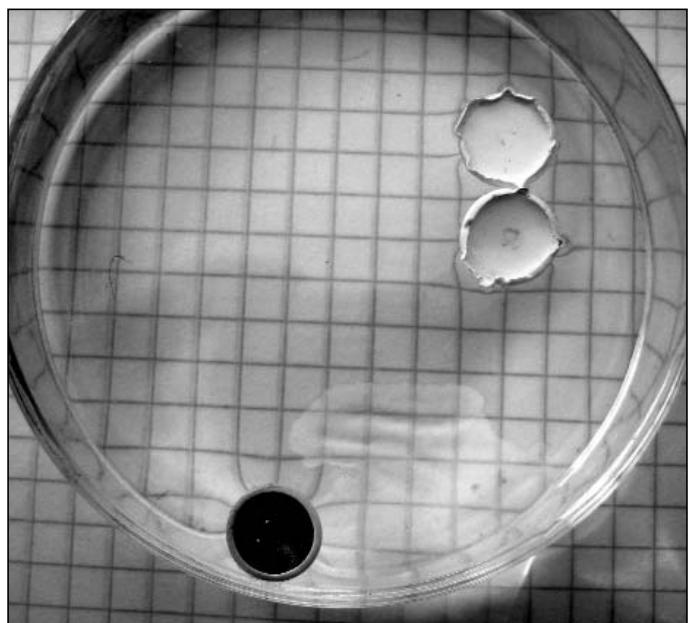


Abb. 8 (oben): Während sich die Heftzwecken zum konvexen Randmeniskus bewegen, stoßen sie ihre eigenen Plastikkappen ab. Diese ziehen sich gegenseitig an und bewegen sich zur höher liegenden Mitte.

Abb. 9 (Mitte): Eine mit Sand belastete Kappe verhält sich wie eine Heftzwecke. Beide haben eine größere Dichte als das Wasser.

Abb. 10 (unten): Hebt man eine Heftzwecke etwas an, sodass sie noch in Kontakt mit dem Wasser bleibt, wo werden in der Nähe befindliche Kappen angezogen. Sie werden heftig abgestoßen, wenn man die Heftzwecke wieder loslässt.

¹⁾ Durch Zugabe eines Spülmittels kann man den Einfluss der Stärke der Oberflächenspannung untersuchen. Die dadurch nahe gelegten ebenfalls sehr interessanten Versuche können hier aus Platzgründen nicht diskutiert werden.

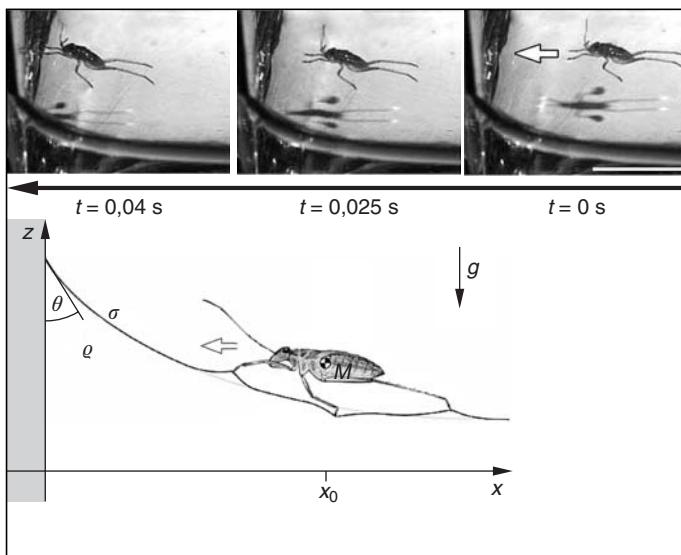


Abb. 11: Der Wasserläufer Mesovelia kann durch seine Vorder- und Hinterkrallen konvexe Menisken erzeugen und sich in dieser Haltung verharren den Abhang hochziehen lassen. (Abbildung aus [5].)

tischen (oder auch elektrischen) Phänomenen gilt hier: Gleichartiges zieht sich an und Ungleichtartiges stößt sich ab. Denn bei der Annäherung gleichartiger Menisken wird die Oberfläche verkleinert, während sie bei der Annäherung ungleichartiger Menisken vergrößert wird.

„Auf der Grenze liegen immer die seltsamsten Geschöpfe“

Von der tiefen Wahrheit dieser Aussage Georg Christoph Lichtenbergs überzeugt man sich, wenn man das Verhalten kleiner Geschöpfe untersucht, die sich auf der Grenze zwischen Flüssigkeit und Luft tummeln. So hat Jearl Walker in seinem „Flying Circus of Physics“ vor einiger Zeit die Frage aufgeworfen, wie die gegenseitige Anhänglichkeit von „Cheerios“ zu erklären ist. Er hatte nämlich festgestellt, dass diese O-förmigen Frühstücksflocken auf der Oberfläche von Milch jede Gelegenheit nutzen, sich zu vereinigen [3]. In Anspielung auf diese seltsamen Geschöpfe ist kürzlich ein Aufsatz erschienen, in dem der „Cheerios-Effekt“ ausführlich untersucht wird [4].

Vielleicht noch interessanter und merkwürdiger ist das Verhalten kleiner Lebewesen, die sich auf der Wasseroberfläche von Tümpeln und Teichen tummeln. Es zeigt sich nämlich, dass diese Geschöpfe das oberflächenspannungsbedingte Bergaufgleiten auf geschickte Weise zur Steigerung ihrer Mobilität auszunutzen wissen [5].

Die Fähigkeit von Wasserläufern, fast widerstandslos auf der Wasseroberfläche zu gleiten, ermöglicht ihnen erstaunlich schnelle und behende Bewegungen. Dieser Vorteil kann für kleinere Tiere an der Grenze zwischen Wasser und Land zu einem ernsthaften Problem werden. Denn der konkav Meniskus stellt für sie, die sie die Wasseroberfläche normalerweise ähnlich eindellen wie eine Heftzwecke so etwas wie eine spiegelglatte schräge Ebene dar.

Angesichts dieser Situation mussten die Tierchen im Laufe der Evolution Techniken entwickeln, die ihnen erlauben, den Meniskus zu überwinden. Sie nutzen dabei ihre Fähigkeit aus, mit Muskelkraft durch starkes Durchbiegen des Körpers oder Anheben von Beinchen, konvexe Menisken in konkav überführen zu können.

Beispielsweise gelingt es dem Wasserläufer Mesovelia (ähnlich wie in dem Experiment, in dem eine zweier aneinander liegender Heftzwecken unter Umstülpung des konvexen Meniskus etwas angehoben wird), mit den Vorder- und Hinterkrallen die Wasseroberfläche hochzuziehen und dabei konvexe in konkave Menisken zu überführen (Abb. 11). Wenn er sich so dem Randmeniskus nähert, wird er in dieser Haltung verharrend die schräge Ebene genau so hinaufgezogen wie in den obigen Experimenten die Styroporkugeln oder die Kappen der Heftzwecken. Die Bewegungslosigkeit des Tierchens während des Lifts sollte jedoch nicht mit Untätigkeit verwechselt werden. Denn durch das Hochziehen des Wassers muss Muskelenergie aufgewandt werden, sodass der Vorgang nicht ohne Anstrengung erfolgt.

Schlussbemerkung

Die oft zu beobachtende geordnete Anlagerung kleiner Objekte auf der Oberfläche einer Flüssigkeit wird als Folge der Minimalisierung der Oberflächen- bzw. Grenzflächenenergie der beteiligten Medien beschrieben. Obwohl augenscheinlich eine höhere Ordnung entsteht als vor der Vereinigung bestand, erfolgt dieser Vorgang im vollen Einklang mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, weil die Minimierung der Oberflächenenergie durch Abgabe der überschüssigen Energie an die Umgebung Entropie produziert.

Anhand von einfach durchzuführenden Freihandexperimenten werden die Anlagerungsvorgänge physikalisch vertieft und durch weitere erstaunliche Beobachtungen bereichert. Insbesondere zeigt sich, dass zwischen Objekten mit konkaven und konvexen Menisken Anziehungs- und Abstoßungssphänomene auftreten.

Schließlich wird das Verhalten jener seltsamen Geschöpfe angesprochen, die auf der Grenze zwischen Wasser, Luft und Land leben und dabei die Minimalisierung der Grenzflächenenergie für die eigene Fortbewegung auszunutzen wissen. Aber auch hier geschieht nichts im Widerspruch zum 2. Hauptsatz. Die Tierchen verbrauchen Muskelenergie, um die zur Aufwärtbewegung nötigen konvexen Menisken zu erzeugen.

Dank

Ich danke Volkhard Nordmeier für den Hinweis auf die in Ref. [5] genannte Arbeit, sowie Hilde Köster, Wilfried Suhr und Udo Backhaus für eine kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- [1] Schlichting, H. Joachim: Energieentwertung- ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität. PDN 49/2 (2000) 2-6; ders.: Von der Energieentwertung zur Entropie. PDN 49/2 (2000) 12-16.
- [2] Schlichting, H. Joachim: Der „bergaufsteigende“ Korken. Praxis der Naturwissenschaften – Physik 41/3, 45 (1992).
- [3] Walker, Jearl: The Flying Circus of Physics. New York etc.: Wiley 1977, p. 71, Problem 3.100.
- [4] Vella, Dominic; Mahadevan, L.: The „Cheerios effect“. Am. J. Phys. 73/9 (2005), 817.
- [5] Hu, David L.; Bush, John W.M.: Meniscus-climbing insects. Nature 437/29 (2005) 733.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. H. Joachim Schlichting, Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, D-48149 Münster, E-Mail: schlichting@uni-muenster.de