

Wenn Luft Druck macht..

Freihandversuche zum Thema: Luftdruck

H. Joachim Schlichting

Vorbemerkung:

Die im folgenden beschriebenen Versuche sind nicht neu. Ich habe sie zum Teil selbst irgendwann einmal vor allem in älterer Literatur zum Thema Freihandversuche gefunden. Dennoch kann ihre Zusammenstellung für den einen oder anderen hilfreich sein und als Quelle zur Auflockerung des Unterrichts dienen. Um die Nähe zur lebensweltlichen Erfahrung aufrechtzuerhalten, habe ich meine Diktion erlebnisbetont gehalten.

Der Geist der leeren Flasche

Ist es der Geist des früheren Inhalts oder die magische Kraft des Handauflegens, die eine leere Weinflasche wieder mit Leben zu erwecken vermag? Diese Frage wird sich so manch einer stellen, wenn er die folgende Situation erlebt: Eine Münze (Groschen) wird auf eine leere Weinflasche gelegt. Dann umfaßt man die Flasche mit beiden Händen (Abb. 1). Anschließend muß man nur noch warten. Manchmal muß man lange warten, aber meiner Erfahrung nach liegt darin ein Reiz, den man selten bei ähnlich einfachen Demonstrationen beobachtet. Die völlige Ereignislosigkeit führt zunächst zu einem Verstummen der Anwesenden und zu einer wachsenden Konzen-

tration auf die Flasche, die nach wie vor bewegungslos von den Händen des "großen Magiers" umschmiegt in den Brennpunkt der Aufmerksamkeit gelangt. Dann plötzlich, nach einer kleinen Ewigkeit, ein erstes "kling" und dann ein regelmäßiges "kling, kling": Die Münze beginnt von unsichtbaren Kräften getrieben auf der Flaschenöffnung einen feinen Tanz zu vollführen.

Natürlich wird der Groschen aufgrund der Ausdehnung der Luft in der Flasche gehoben. Die Ausdehnung wird durch die übertragene Körpertemperatur bedingt. Die Antwort wird i.a. schnell gefunden. Der nachhaltige Eindruck des Versuchs beruht vielmehr auf dem relativ geringen Aufwand, der zu diesem Ergebnis führt. Daher ist es nur im Notfall, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Händen und Flasche zu gering ist, zu empfehlen, die Flasche in heißem Wasser zu erwärmen. Die Benutzung einer vorher gekühlten Flasche ist hingegen unschädlich.

Je nachdem welchen Stellenwert dieser Versuch im Unterricht haben soll, kann man die Aufmerksamkeit auch noch auf andere Phänomene lenken. So kann es von einem Interesse sein, zu erklären, weshalb der Druckausgleich nicht einmalig, sondern in einem fast regelmäßigen Rhythmus erfolgt. Dadurch können Regelmechanismen in die Diskussion gebracht werden, die beispielsweise für die Erklärung eines Geysirs von Bedeutung sind.

Die Beschwörung eines schlaffen Luftballons

Der Geist der leeren Flasche vermag noch mehr. Er kann in einen schlaffen Luftballon schlüpfen, den man über die Öffnung einer Flasche gestülpt hat, und diesen zu neuem Leben zu erwecken. Dazu bedarf es wieder des beschwörenden Umfassens der Flasche mit beiden Händen. Nach einiger Zeit lassen sich kleine Bewegungen im Gummi und ein leichtes Anwachsen des Ballons beobachten (Abb. 2), das schließlich durch ein plötzliches Hochschnellen des Ballons gekrönt wird. (Wir haben bislang nicht untersucht, ob ähnlich wie bei Schlangenbeschwörungen die musikalische Untermalung mit einer Flöte den Vorgang



Bild 1: Die Münze „tanzt“ auf der Flaschenöffnung.

des Aufrichtens wesentlich zu beschleunigen vermag). Sich selbst überlassen sinkt der Ballon genauso plötzlich, wie er sich aufrichtete, aber bei geringerem Innendruck, wieder in sich zusammen. Die Plötzlichkeit und das hystereseartige Verhalten deuten übrigens auf Ähnlichkeiten mit Phasenübergängen 1. Art hin (einfache Freihandversuche dazu findet man in [1]). (Auch bei diesem

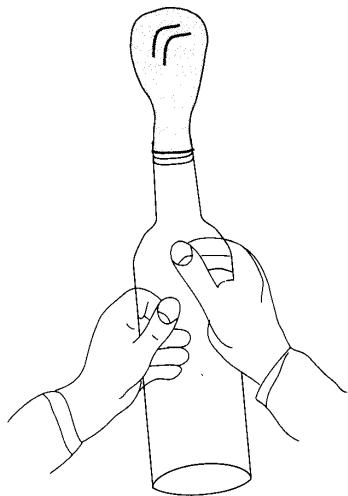


Abb. 2: Beschwörung eines Luftballons

Versuch muß man notfalls auf die allerdings weniger eindrucksvolle Alternative der Erwärmung der Flasche in warmem Wasser zurückgreifen).

Der Geist der Flasche wird wiederum durch Lufterdruckerhöhung aufgrund der Erwärmung der Luft in der Flasche aktiviert. Statt zu entweichen, verschafft sich die Luft dadurch "Luft", daß sie ein größeres Volumen einnimmt, auch wenn dabei durch Aufrichten des Luftballons Arbeit an der Umgebung verrichtet werden muß.

Eine interessante Variante dieses Versuchs, gewissermaßen die inverse Beschwörung, erhält man, wenn man die Flasche abkühlt. Dann kommt es zu einer Volumenverkleinerung, indem sich der Luftballon in die Flasche hineinstülpt. In diesem Fall empfiehlt es sich, eine durchsichtige Flasche zu benutzen.

Eine Lufterdruckkatastrophe

Eine Volumenverkleinerung aufgrund der Abkühlung einer eingeschlossenen Luftmenge hat, wie wir gesehen haben, Einstülpertendenzen zur Folge. Die Einstülpung kann zu einem optisch wie akustisch eindrucksvollen Spektakel gestaltet werden, wenn man zunächst durch Erwärmung Luft aus einem Bleckanister vertreibt und ihr den Rückweg dadurch abschneidet, daß man den Kanister nach der Erwärmung luftdicht verschließt. In dem Maße, wie durch Abkühlung die Verhältnisse im Kanister wieder erträglicher werden,

möchte die verdrängte Luft zurück und übt einen entsprechend wachsenden Druck auf den Behälter aus. Der Druck wird nach einiger Zeit so stark, daß der Kanister nicht widerstehen kann und plötzlich unter einem charakteristischen Knall in sich zusammenbricht bzw. von unsichtbarer Hand (Luft ist unsichtbar!) zermalmt wird. Dadurch kommt die Luft zwar nicht in den Kanister hinein, verkleinert das Volumen aber so stark, daß sie das ihr zukommende Raumgebiet wieder einnehmen kann.

Der Vorgang ist insofern unumkehrbar, als der Kanister (z.B. ein 5l Ölkanister) auch nach erneuter Öffnung nicht wieder seine alte Form annimmt. Umkehrbare Verhältnisse erreicht man, wenn statt des Bleckkanisters ein Plastikkanister benutzt wird. Allerdings fällt dann die akustische Untermalung des katastrophalen (also wiederum phasenübergangsähnlichen) Vorgangs weniger eindrucksvoll aus.

Wie ein Weinglas zu einem Luftkissenboot wird

Der folgende Versuch ist mir seit meiner Kindheit deshalb in deutlich unangenehmer Erinnerung geblieben, weil er für mich eine konkrete Bestätigung des bekannten Ausspruchs: "Undank ist der Welten Lohn" wurde. Als ich nämlich meiner Mutter nach einer Feier beim Spülen half und die mit äußerster Sorgfalt gereinigten wertvollen Weingläser mit der Öffnung nach unten zum Abtropfen auf die Resopalplatte eines Tisches stellte, wurde ich plötzlich durch ein Geräusch alarmiert, das zu vermeiden bis dahin meine ganze Aufmerksamkeit erfordert hatte: Ich beobachtete, wie die alten Erbstücke wie von Geisterhand getrieben, auf den Rand des Tisches zuschlitterten und ... in mein Unglück stürzten.

Die Erklärung ist viel weniger dramatisch als jenes Ereignis und erst recht als die Ereignisse die darauf folgten: Das von den gespülten Gläsern herunterrinnende Wasser führte dazu, daß aufgrund der Kohäsion zwischen Glasrand und Wasserfilm der Innenraum des Glases luftdicht "abgedeckt" wurde. Inzwischen gab das vom Spülwasser noch warme Glas Wärme an die Umgebung, also auch an die im Glas eingeschlossene Luft ab. Die dadurch bedingte Ausdehnung und Lufterdruckerhöhung führte zu einem leichten Anheben des Glases. Verhängnisvoll war in meinem Fall nur, daß der Tisch eine kleine Neigung aufwies. Dadurch konnten sich die Gläser auf einem Luftkissen gleitend durch die "Hangabtriebskraft" des schiefen Tisches angetrieben in Bewegung setzen.

Auf ebener Unterlage kommt es zu einer Verkantung des Glases und einem Luftdruckausgleich, der insbesondere dann, wenn noch Spülmittel im Wasser ist, zur Bildung wunderschöner Seifenblasen führen kann.

Wichtiger Hinweis: Man benutze keine wertvollen Gläser für die Demonstration der Luftkissenbewegung, auch wenn man die Gläser nur durch leichtes Anblasen in Bewegung setzen möchte und keine Tischkante in der Nähe ist.

Ein Trost bleibt uns: Diejenigen Gläser, die die Luftkissenfahrt heil überstanden, weil sie kurz vor der Tischkante zur Ruhe kamen, oder sich gar nicht erst in Bewegung gesetzt haben, kleben anschließend zuweilen bombenfest auf ihrer Unterlage als ob sie die Gefahren ahnten. Kühlte sich nämlich das Glas und schließlich auch das eingeschlossene Luftvolumen wieder auf Umgebungstemperatur ab, so zieht sich die Luft zusammen und baut einen Unterdruck im Vergleich zur Außenluft auf. Diese preßt das Glas dementsprechend fest auf die Unterlage.

Durch diese hohle Gasse muß er kommen

Dieser Versuch ist die Antwort auf die folgende Preisfrage: Wie bekomme ich ein hartgekochtes Ei in eine Milchflasche? Da das Ei nur etwas größer ist als die Öffnung der Milchflasche, hoffen die Schüler, es durch Zusammendrücken hineinzubekommen. Der Versuch ist auf jeden Fall zum Scheitern verurteilt, wie man experimentell oder durch Überlegung zeigen kann. Falls die Schüler dazu neigen, den Versuchsausgang über den Umweg von Röhrei herauszufinden, versuche ich sie durch eine selbsterlebte Geschichte auf die gedankliche Lösung zu bringen. Die Geschichte handelt von dem Versuch, eine Weinflasche ohne Korkenzieher durch Hineindrücken des Korkens in die Flasche zu öffnen (In solche Situationen kann man kommen!). Sie endete in einer mittleren Katastrophe: Der Boden der Flasche war herausgebrochen und das kostbare Naß unwiederbringlich im Perserteppich verschwunden.

Die Antwort auf die Preisfrage kann durch mehrere Experimente nahegelegt werden. Entweder man stellt die Flasche in heißes Wasser bis sie richtig durchgewärmt ist oder man wirft ein brennendes Stück Papier (bzw. einen mit Spiritus getränkten brennenden Wattebausch) in die Flasche, bevor man das Ei so auf die Flaschenöffnung positioniert (Abb. 3), daß diese gut verschlossen ist. Dann erlebt man das Ei, wie von unsichtbaren Kräften in die Länge gezogen durch den Flaschenhals rutschen und unter mehr oder weniger kräftigem "Flopp" in die Flasche plumpsen. Die

Geschwindigkeit des Vorgangs kann durch die verwendete Technik gesteuert werden: Erwärmte Flaschen lassen das Ei langsam hineirutschen. Ein lichterloh brennender Wattebausch führt zu einem fast explosionsartigen Ereignis. Dieser Knalleffekt mag zwar zur Belebung einer gegebenen Situation beitragen, hinterläßt aber in den meisten Fällen Röhrei. Demgegenüber bleibt bei einem moderateren Ausführen des Experiments das Ei meist ganz, und es kann der Eingangsprisfrage die Ausgangsprisfrage angeschlossen werden: Wie bekomme ich das Ei wieder aus der Flasche heraus? Obwohl der Versuchsablauf bereits einiges über die zugrundeliegende Physik verrät, kommt man auch in diesem Fall meist nicht auf eine praktizierbare Antwort. Dabei liegt sie so nahe: Man hält die Flasche überkopf und positioniert das Ei so über die Innenseite der Flaschenöffnung, daß diese wieder gut verschlossen wird. Jetzt bläst man von unten einmal kräftig in die Flasche und bringt sein Gesicht sofort in Sicherheit. Denn unmittelbar anschließend kommt das Ei mehr oder weniger heftig aus der Flasche herausgeschossen. Schafft man es auch noch, das Ei unversehrt aufzufangen, so kann man sich des Beifalls der Schüler sicher sein, ein Vorgang, den ein Physik-

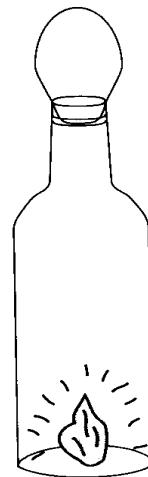


Abb. 3: Die Flamme erlischt, und das Ei wird wie von unsichtbarer Hand in die Flasche gezogen.

lehrer wohl nicht allzu oft erlebt. Aber auch wenn das Ei im günstigsten Fall auf dem Boden zerstellt und der Umweg über Röhrei doch noch unvermeidbar wird, hat man zumindest die Lacher auf seiner Seite.



Abb. 4: Der Negerkuß bläht sich zu einem braunen Reisen mit weißen Rissen auf.

Die Einfachheit der Erklärung steht in keinem Verhältnis zum Spektakel des Ereignisses selbst. In beiden Fällen wird eine geeignete Druckdifferenz erzeugt, deren Ausgleich nur dadurch erfolgen kann, daß die Luft das Ei vor sich hertreibt. Im ersten Fall wird in der Flasche durch Abkühlung der vorher erwärmteten Luft ein Unterdruck erzeugt. Im zweiten Fall wird an den als Ventil wirkenden Seiten des Eis Luft ins Glas geblasen und ein kurzfristiger Überdruck erzeugt, der sich anschließend wieder ausgleicht und dabei das Ei herausdrückt.

Von der wunderbaren Vergrößerung eines Negerkusses

Für all diejenigen, die Negerküsse mögen, habe ich einen heißen Tip: Man setze einen Negerkuß in ein Einmachglas und lege einen mit Spiritus getränkten Wattebausch hinzu. Nachdem der Wattebausch angezündet worden ist, schließt man das Glas vorschriftsmäßig mit feuchtem Gummiring und Deckel. Man beobachtet wie die Flamme erlischt und - man glaubt seinen Augen kaum zu trauen - der Negerkuß über sich selbst hinauswächst. Die Schokoladenhaut bleibt von dem Wachstum unberührt und bricht wie getrockneter Schlamm in mehr oder weniger regelmäßige Fragmente auf (Abb. 4).

Das Erfolgserlebnis einer physikalischen Erklärung wird allerdings durch das Ergebnis der Erklärung selbst wieder getrübt: Der Negerkuß ist nämlich wie Schaumstoff aus zahlreichen luftgefüllten Hohlräumen aufgebaut. Die Luft steht unter Atmosphärendruck. Im Einmachglas wird infolge der Verbrennung die Luft erwärmt und aus dem Glas ausgetrieben. Nachdem durch Abdeckeln des Glases die Flamme erstickt ist und eine erneute Abkühlung einsetzt, entsteht im Glas eine Unterdruckatmosphäre, in der den unter normalem Luftdruck stehenden Hohlräumen des Negerkus-

ses nichts anderes übrigbleibt, als sich entsprechend auszudehnen. Die schmackhafte Negerkußsubstanz selbst wird also nicht vermehrt.

Als schöne Nebenwirkung drückt die unter höherem Druck stehende äußere Luft den Deckel so fest auf das Glas, daß wir es nicht ohne weiteres öffnen können. Erst über den üblichen Trick, mit dem man die Gummidichtung zwischen Deckel und Glas löst, kann man einen Luftausgleich bewirken. Die durch die obige Erklärung nahegelegte aber nur selten gehegte Erwartung, daß der Negerkuß wieder schrumpft, erfüllt sich ebenfalls in vollkommener Weise: Er nimmt seine alte kompakte Form wieder an. Lediglich leichte Fissuren im Schokoladenlack erinnern an das Zwischenstadium eines braunen Riesen.

Eine schnelle Mark verdienen

Ein Markstück liegt in einer flachen Schale unter einer dünnen Wasserschicht. Wem es gelingt, das Markstück unter alleiniger Benutzung eines kleinen Glasgefäßes an sich zu bringen, ohne sich die Finger naß zu machen, darf es behalten. (Wichtiger Hinweis: Ein Lehrer, der bereits die anderen hier dargestellten Versuche mit den Schülern durchgenommen hat, sollte sich evtl. eine etwas

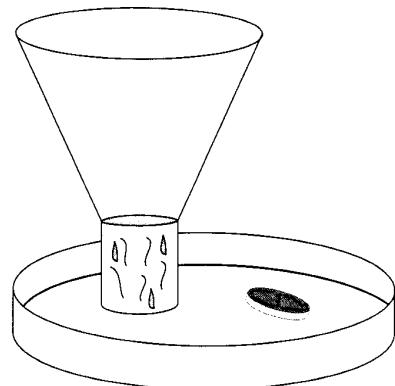


Abb. 5. Das Wasser steigt im Erlenmeyerkolben auf und legt die Münze frei

andere Problemstellung ausdenken, will er kein armer Mann werden).

Der Trick besteht darin, daß das kleine Glasgefäß zunächst stark erwärmt und damit teilweise evakuiert wird. Stülpt man dieses Gefäß nun neben die Münze kopfüber in die Schale, so steigt daß Wasser in ihm auf, entleert die Schale und legt auf diese Weise das Markstück trocken (Abb. 5). Aufgrund der Abkühlung des Glases entsteht im Glas ein Unterdruck. Ein Ausgleich ist nur dadurch möglich, daß die von außen drückende Luft solange Wasser in das Gefäß treibt, bis das Innenvolumen entsprechend verkleinert worden ist.

Durch Kühlen kochen

Durch Kühlen zu kochen, wenn man unter Kochen oder besser: Sieden, das Aufwallen und Sprudeln von Wasser versteht, klingt wie ein Widerspruch in sich. Dennoch, der natürliche Trieb, Luftdruckunterschiede möglichst wieder zum Verschwinden zu bringen, macht möglich; auch wenn dieses Ziel zuweilen - wie in den obigen Versuchen demonstriert - nur unter den merkwürdigsten Begleiterscheinungen erreichbar ist. Dazu nehme man einen zur Hälfte mit Wasser gefüllten Rundkolben, das gerade gekocht hat, seinen extremen Zustand aber durch keinerlei Aufwallungen mehr verrät, und präsentiere es fest verstöpselt, kopfüber an einem Stativ fixiert dem Publikum. Jetzt übergieße man es mit kaltem Wasser. Auch wenn es an Zauberei zu grenzen scheint, das Wasser im Rundkolben beginnt unter heftigen Aufwallungen zu sieden (Abb. 6). Wieder ist der Luftdruck schuld, wenn auch in einer etwas indirekten Weise. Übergießt man den mit heißem Wasser und dessen Dampf gefüllten Kolben mit kaltem Wasser, so kondensiert ein Teil des Dampfes an der auf diese Weise abgekühlten Glaswandung des Gefäßes. Dadurch schrumpft das Volumen und

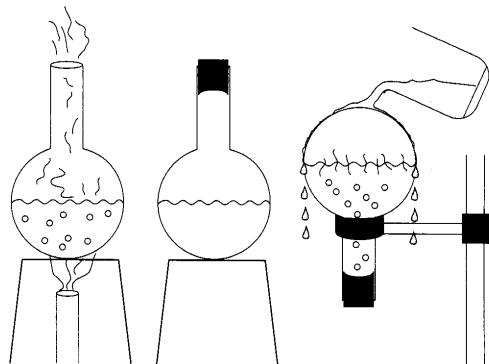


Abb. 6: Mit kaltem Wasser „abgeschreckt“ beginnt das heiße Wasser erneut zu sieden

bewirkt einen entsprechenden Unterdruck im Dampfraum des Kolbens. Eine Dampfdruckerniedrigung hat aber eine Siedepunkterniedrigung zur Folge, weil es unter geringerem Druck für die Wasserteilchen leichter ist, den Flüssigkeitsverband zu verlassen als unter höherem Druck. Da die Temperatur des heißen Wassers noch nicht unterhalb des Siedepunktes bei normalem Druck liegt, kann durch die Druckerniedrigung der Siedepunkt leicht unter die aktuelle Wassertemperatur sinken und die Siedeerscheinung auslösen.

Warum sprechen uns diese Versuche an?

Dafür gibt es sicherlich mehr als nur einen Grund. Ich möchte daher nur einen Aspekt herausgreifen,

der mir in der Diskussion mit Schülern und Studenten immer wieder aufgefallen ist: Die Versuche werden teilweise zumindest unterschwellig als der Erfahrung widersprechend erlebt.

Wo erhebt sich auch schon eine Wassersäule wie von selbst, ohne daß ein Antrieb zu erkennen wäre? Das Erstaunen wird bei physikalisch vorgebildeten Personen durch gezieltes Nachfragen eher noch größer: Unter energetischem Blickwinkel rücken diese Versuche nämlich leicht in die Nähe eines Perpetuum mobile (2.Art). Stellen wir doch einfach die Frage: Woher stammt die mechanische Energie der steigenden Wassersäule? Aus der Wärme, die dem Glas vorher zugeführt wurde? Das ist schwer denkbar. Denn das Glas steht mit fast seiner gesamten Fläche mit der umgebenden Luft in Kontakt aber kaum mit dem Wasser, in das es nur leicht eintaucht. Daher wird es während seiner Abkühlung auf Umgebungstemperatur die Wärme im wesentlichen an die umgebende Luft abgeben. Als Energielieferant wird derjenige, der an den Energieerhaltungssatz glaubt, die Umgebungsluft ansehen. Aber haben wir nicht gelernt, Umgebungswärme läßt sich nicht in Arbeit verwandeln? Oder : Wärme läßt sich nur unvollständig in mechanische Energie verwandeln? Derartige Sätze werden zweilen als populäre Fassungen des Entropieprinzips angesehen. Schon Max Planck [1] hat wiederholt auf das Mißverständnis hingewiesen, das von diesen Sätzen ausgeht. Unsere Versuche zeigen sogar das Gegenteil. Die Schwierigkeiten röhren daher, daß man etwas übersieht: Der Entzug von Energie aus der Umgebungsluft nämlich nicht das einzige ist, das in der Welt passiert. Gleichzeitig läuft mit der Abkühlung des Glases ein Temperaturausgleichsvorgang ab. Die damit verbundene Entropiezunahme kompensiert gewissermaßen die mit der Umwandlung von Wärme in Arbeit einhergehende Entropieabnahme (Auf diese Problematik wird ausführlich z.B. in [3] eingegangen).

Literatur

- [1] Schlichting, H.J.: Zu Phasenübergängen. Physik und Didaktik 16/2, 163 (1988)
- [2] Planck, M.: Thermodynamik. Berlin: De Gruyter 1952, S.85f
- [3] Schlichting, H.J.: Energie und Energieentwertung. Heidelberg: Quelle & Meyer 1983.