

Die Entstehung falscher Präkonzepte am Beispiel Luft

Tief im Unbewussten selbst vieler gebildeter Zeitgenossen ist «Luft» ein Synonym für «Nichts». In den letzten fünf Jahren vor meiner Pensionierung am Paul Scherrer Institut durfte ich ein Schülerlabor «iLab» aufbauen, in dem ich anhand von Vakuum-Experimenten faszinierende Einblicke in die Gedankenwelt von Jugendlichen und manchmal auch der begleitenden Lehrpersonen erhielt. Dies hat mich motiviert, den vorliegenden Artikel zu verfassen.

Unbewusster Versprecher

In einem Vortrag für Wissenschaftler im PSI-Auditorium ging es um die Grössenverhältnisse bei Atomen und der Vortragende unterstrich seine Ausführungen mit der Bemerkung: «...und zwischen den Elektronen und dem Kern hat es absolut nichts – LUFT». Die höfliche Stille im Hörsaal verhinderte, dass der Vortragende seinen Lapsus bemerken konnte, aber die Macht falscher Präkonzepte aus der Kindheit hat sich klar gezeigt.

Was befindet sich zwischen benachbarten Luftmolekülen?

Als Einführung zu den Experimenten im Vakuumlabor wollte ich jeweils von Maturaklassen erfahren, welche Vorstellungen die Jugendlichen von physikalischen Prozessen und Zusammenhängen neben auswendig gelernten Formeln entwickelt haben. Ich erwähnte deshalb, dass die Dichte eines Gases bei Atmosphärendruck rund tausendmal kleiner ist als beim entsprechenden Festkörper (z.B. bei Wasserdampf und Eis) und dass deshalb die mittlere Distanz zwischen benachbarten Gasatomen etwa zehn Moleküldurchmesser betragen muss (die dritte Wurzel aus 1000). Meine beliebte Frage betraf dann den Zwischenraum und was sich wohl darin befinden möge. Nach einer etwas verdutzten Pause kamen erste Antworten wie Luft, CO₂, Wasserdampf, Schadstoffe, die ich alle mit einfach verständlichen Argumenten widerlegen konnte, bis sich schliesslich jemand getraute, «Nichts» oder «Vakuum» zu erwähnen: eine Erleuchtung!

Meine nächste Frage, weshalb die Luftmoleküle nicht einfach zu Boden fallen würden und ein Luftmeer von etwa 8 Metern Tiefe bilden würden, war eine noch grössere Herausforderung. Die ersten Antworten betrafen abstossende elektrische oder magnetische oder «sonstwelche» Kräfte zwischen den Molekülen, die diese auf Distanz halten würden.

Da die Brown'sche Molekularbewegung normalerweise nur unter dem Mikroskop in Flüssigkeiten gezeigt wird, schien es für die Jugendlichen eine gewagte Hypothese, dass sich die Atmosphäre durch Moleküle oben halten könnte, die sich mit Geschwindigkeiten von etlichen hundert Metern pro Sekunde bewegten. Klar, dass danach meine Bemerkung folgen musste, die kinetische Energie der Moleküle sei proportional zur absoluten Temperatur in Grad Kelvin und diese würden also beim absoluten Nullpunkt still stehen.

Welche Masse hat ein Kubikmeter Luft?

Diese Frage nach der Dichte der Luft in Bodennähe kann man im Freundeskreis, am Vereinsabend oder einer Maturaklasse stellen. Das Spektrum der Antworten ist überall etwa gleich: von gar nichts über sehr, sehr wenig bis hunderte von Gramm oder sogar mehr als ein Kilogramm. Interessant ist, dass sehr viele wissen, dass der Atmosphärendruck «ein Kilogramm pro Quadratzentimeter» ist. Mit etwas Augenzwinkern interpretiert man die Masseinheit als «Gewicht eines Kilogramms pro Quadratmeter» und der Sachverhalt wäre auch physikalisch in Ordnung.

Typische Pedanterie der Physiker? Nein, ganz im Gegenteil! Indem der Atmosphärendruck nicht als eine Kraft pro Fläche aufgefasst wird, geht der Zusammenhang verloren, dass die Luft eine Masse und damit ein Gewicht hat. Folgende Überlegung zeigt diesen Zusammenhang: Hätte die Luft in jeder Höhe dieselbe Dichte wie am Boden, hätte die Atmosphäre eine scharfe Obergrenze (wie ein See) in rund 8 Kilometern Höhe. Der Luftdruck am Boden wäre derselbe und könnte einfach berechnet werden. Über einem Quadratmeter befänden sich 8000 Kubikmeter Luft und diese Luftsäule hätte das Gewicht einer



Abb. 1: Demonstration der Wirkung des Luftdrucks anlässlich der Einweihung des Vakuumlabors am Schülerlabor iLab des PSI am 29. Oktober 2010. Das Foto zeigt den Augenblick nach der Implosion des Fasses, die durch einen Knall begleitet wurde. Bild: Markus Fischer, PSI

Masse von 10 Tonnen ($100\text{ cm} \times 100\text{ cm} = 10\,000\text{ cm}^2$ und über jedem cm^2 befindet sich 1 kg Masse). Nun bekommt man die Masse eines Kubikmeters Luft als $10\,000\text{ kg} / 8000\text{ m}^3$ oder rund $1,2\text{ kg/m}^3$.

Warum wiegt dann ein Sack voll Luft auf einer Waage nur das Gewicht des Sacks? Luft schwimmt in Luft oder physikalischer ausgedrückt: Der Auftrieb ist gleich dem Gewicht. Um das Luftgewicht mit einer Waage zu messen, müsste die Luft in ein druckfestes Gefäss eingeschlossen werden. Dieses Gefäss müsste zusammen mit der Waage in ein Vakuum gestellt werden, um die Summe der Gewichte des Gefässes und der darin enthaltenen Luft zu messen.

Eindrückliche Demonstration

Will man mit einem physikalischen Experiment möglichst viele Leute in Erstaunen versetzen, muss man einen Effekt wählen, der gegen ein weit verbreitetes falsches Präkonzept verstösst und einfach verständlich ist. Ein solches Experiment, das auch etwas mit Vakuum zu tun hatte, musste zur Eröffnung des Vakuumlabors im Schülerlabor iLab des PSI gezeigt werden. Es lag auf der Hand, ein stabiles Fass durch den normalen Luftdruck zusammendrücken zu lassen.

Zur Vorbereitung wurden einige Liter Wasser eingefüllt und zum Sieden gebracht. Wichtig war, so lange zu warten, bis das ganze Fass überall den Sie-

depunkt erreichte und deutlich sichtbar Dampf aus der sich oben befindenden Einfüllöffnung austrat. So wurde sichergestellt, dass der gesamte Inhalt des Fasses nur noch reiner Wasserdampf war und die Luft vollständig verdrängt war. Nun wurde das Fass verschlossen und die Heizung entfernt. Um das hochkarätige Publikum nicht zu langweilen, wurde der Abkühlvorgang mit Hilfe einer Spritzkanne mit kaltem Wasser beschleunigt.

Der Dampf im Innern des Fasses kondensierte durch die Abkühlung bis auf einen kleinen Dampfrest von wenigen Prozent und es entstand eine Druckdifferenz Aussen minus Innen von nahezu einer Atmosphäre. Die Kraft von nahezu dem Gewicht eines Kilogramms auf jeden Quadratzentimeter hat dann das Fass mit einem Knall in eine Form überführt, wie wenn ein Ungeheuer daraufgetreten wäre. Abb. 1 zeigt den Moment nach der Implosion, die obwohl angekündigt, sich für die Zuschauenden trotzdem überraschend abrupt ereignete. Ich weiss aber auch, dass die Macht falscher Präkonzepte so gross ist, dass viele überzeugt waren, nicht die Luft habe das Fass von aussen her zusammengedrückt, sondern das Vakuum habe das Fass von innen her zusammengezogen.

Es war nicht der geeignete Moment für eine Umfrage zu dieser Sache, aber am deutlichsten hat mir in einer späteren Lektion eine (nicht in den Naturwissenschaften tätige) Lehrperson durch eine spontane Reaktion verraten was sie denkt: «Ja ich sehe schon, in der Physik muss man alles verkehrt rum denken!»

Warum überlebt der Dampfkochtopf die Abkühlung?

Das identische Experiment wird übrigens in jeder Küche millionenmal mit dem Dampfkochtopf durchgeführt: Beim Erhitzen schliesst das Druckregulierventil vorerst nicht, um die Luft entweichen zu lassen. Die sich bildende sauerstoffarme Dampfathmosphäre verhindert eine Oxidation der Speisen, so dass Farben, Vitamine und andere Stoffe besser erhalten bleiben. Sobald heisser Dampf austritt, schliesst das Ventil und eine Dampfathmosphäre mit einem Druck von maximal 2 Atmosphären wird in kurzer Zeit aufgebaut. Zu diesem Zeitpunkt ist der Inhalt des Dampfkochtopfes rund 120°C heiss und das Ventil öffnet sich leicht, damit dieser Druck nicht überschritten wird.

Nun kommt der spannende Teil: Der Dampfkochtopf wird mit kaltem Wasser übergossen, damit der Überdruck verschwindet und man den Deckel



Abb. 2: Dampfkochtopf der 1960er Jahre mit von innen her schliessendem Deckel. Der gekrümmte elastische Bügel wird rechts am Henkel der Pfanne mit einer Schnalle fixiert. Damit der Deckel in die Pfanne eingeführt werden kann, biegt er sich in Ruhelage leicht nach unten. Bild: Michael Nebel, Wikipedia CC BY-SA 3.0



Abb. 3: Trichterexperiment als Paradebeispiel für das Bernoulli Paradoxon. Es gelingt nicht, den violetten Papiertrichter aus dem Plastiktrichter hinauszublases. Würde man ein Gebläse an den Trichter anschliessen, könnte man sogar Gewichte an den Papiertrichter anhängen, ohne dass dieser nach unten fällt. Bild: Sofia Tsintsifa

öffnen kann, wobei der obere Teil des Topfes recht kalt werden kann. Der Wasserdampf kondensiert also im Innern des Topfes, der Dampfdruck sinkt auf einen kleinen Wert und das Überdruck-Ventil ist geschlossen. Warum wird der Topf nicht zusammengedrückt?

Ich kenne zwei Systeme: Beim in Abb. 2 gezeigten älteren System schliesst der Deckel den Topf von innen her und wird mit einem elastischen Bügel oben gehalten. Sobald der Druck aussen grösser ist als innen, wird der Deckel etwas in den Topf hineingedrückt und lässt Luft einströmen. Beim modernen System schliesst der Deckel von aussen her, ähnlich wie bei einem Schraubdeckel. Die Verbindung zwischen Deckel und Topf wird aber erst dicht durch einen dicken, weichen Gummiring, der von innen her abschliesst. Sobald der Aussendruck grösser wird als der Innendruck, wird dieser Ring etwas in den Topf hinein gedrückt und es kann Luft einströmen.

Der Bernoulli-Effekt als hydrodynamisches Paradoxon

Jedes Kind weiss, dass eine bergab rollende Kugel schneller wird. Aus der Erhaltung der Energie bei reibungsfreien mechanischen Vorgängen folgt, dass bei einer Bewegung die Summe von potenzieller und

kinetischer Energie konstant bleibt. Dies gilt auch längs eines Stromfadens in Luft. Man stelle sich ein Luftpaket vor, das sich in einer laminaren Strömung (ohne verwirbelt zu werden) fortbewegt. Seine Geschwindigkeit oder seine kinetische Energie kann nur durch Druckdifferenzen verändert werden. Der Luftdruck entspricht dem Gravitationspotenzial im vorigen Beispiel und analog dazu lautet das Energieerhaltungsgesetz von Daniel und Johann Bernoulli (Basel, 18.Jh.) für eine reibungsfreie, laminare Strömung: Die Summe von Druck p (in N/m^2 , N = Newton = Masseinheit für Kraft) und kinetischer Energiedichte ($p + \frac{1}{2} \rho v^2$, ρ = Luftdichte = $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ in Bodennähe, v = Geschwindigkeit in m/s) ist längs eines Stromfadens konstant. Wenn der Druck längs eines Stromfadens abnimmt, wird das Luftpaket schneller. Wie bei der Kugel kann man diese Schlussfolgerung auch umkehren: Dort wo die Kugel schneller wird, geht es bergab. Also für Luft: Dort wo die Luft schneller fliesst, ist der Druck kleiner. Weshalb wird dieser einfache Zusammenhang manchmal zu einem «Paradoxon»?

Das Paradebeispiel ist das Trichterparadoxon, das auch zu Hause auf Anhieb gelingt und für Erstauen sorgt. Man konstruiere einen zu einem Trichter genau passenden und an seiner Spitze geschlossenen

Rotationskegel aus Papier (violett in Abb. 3) und lege diesen in den Trichter. Durch einen Luftstrom wird der Papierkegel nicht weggeblasen sondern angezogen, was durch die Bernoulli Gleichung einfach zu verstehen ist. Im dünnen Spalt zwischen Kegel und Trichter fliesst die Luft schnell und es herrscht dort also ein Unterdruck gegenüber der eingeblasenen Luft. Dieser Unterdruck ist so gross, dass der Luftdruck im Spalt kleiner wird als der Umgebungsdruck der ruhenden Luft und die so entstehende Druckdifferenz drückt den Papierkegel in den Plastiktrichter hinein, bis nur noch ein dünner Spalt bleibt.

Die Breite dieses Spaltes ergibt sich durch ein dynamisches Gleichgewicht: Je grösser die Luftgeschwindigkeit im Spalt, desto grösser die Druckdifferenz und die Kraft, die den Spalt verkleinert. Je kleiner der Spalt desto grösser die Reibung, wodurch sich der Druckabfall im Spalt und die Luftgeschwindigkeit verringern. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, so dass beide Prozesse sich die Waage halten.

Warum ein Flugzeug fliegt

Ein weiteres Beispiel für das Bernoullische Gesetz ist der Auftrieb eines Flugzeugflügels. Oberhalb des gewölbten Flügelprofils ist der Weg, den die Luft zurücklegen muss, etwas länger als längs der flachen Unterseite des Flügels. Deshalb fliesst die Luft gegenüber dem Flügel oberhalb schneller als unterhalb und es bildet sich ein Unterdruck oberhalb des Flügels. So entsteht eine nach oben gerichtete Auftriebskraft, die das Flugzeug trägt (vgl. Vierteljahrsschrift 3|2019 S. 8-10).

Die Vorstellung, dass der Druck unterhalb des Flügels grösser sein müsse als oberhalb, ist wahrscheinlich auf Kindheitserfahrungen zurückzuführen: Hält man die Hand schräg nach oben aus dem fahrenden Auto, wird sie nach oben gedrückt, was absolut korrekt als Auftriebskraft verursacht durch die Ablenkung des Luftstroms nach unten aufgefasst werden kann. Der dabei auftretende enorme Luftwiderstand wird bei diesen Experimenten jedoch ausgeblendet. Ein Flugzeug, das auf diese Art fliegt, wäre zu vergleichen mit einem Auto, das ohne Räder schlittenartig bergab fährt. Bei Flugzeugen wird dieser Effekt in abgeschwächter Form vor allem bei der Landung verwendet, indem Landeklappen ausgefahren werden, die den Auftrieb erhöhen und gleichzeitig das Flugzeug abbremsen, was beides erwünscht ist, um möglichst langsam aufsetzen zu können.

Entstehung falscher Präkonzepte

Die meisten der ein Leben lang überdauernden falschen Vorstellungen dürften sich aus falschen Verknüpfungen verschiedener Erfahrungen ergeben. Mit dem «Saugen»-Beispiel kann dies einfach illustriert werden: Jedes Kind macht die Erfahrung, dass man durch eine Anstrengung einen Wagen ziehen kann. Man kann aber auch durch eine Anstrengung die Milch im Röhrchen hochziehen. Die physikalische Vorstellung, dass durch «saugen» ein Unterdruck entsteht und dadurch der Luftdruck die Milch hochdrücken kann, ist den Kindern zu kompliziert.

Schade ist nur, dass die heranwachsenden Jugendlichen vielfach nicht bereit sind, die kindliche Vorstellung durch die korrekte Ursache-Wirkungskette zu ersetzen. Weil als Folge viele physikalische Effekte den falschen Präkonzepten widersprechen, wird die Physik als unverständlich betrachtet, und viele behelfen sich mit auswendig gelernten Formeln, um über die Runden zu kommen. Und so wird im Laufe des Lebens schrittweise ein kompliziertes Weltbild aufgebaut, das sich immer weiter von gesicherten Fakten über unsere Welt entfernen kann.

Ich habe alle falschen Ansichten der Jugendlichen als interessant empfunden, weil sie zeigen, dass die meisten sich im Physikunterricht nur wenig konkrete Vorstellungen von den behandelten Phänomenen machen. Insbesondere werden offensichtlich die banalsten Fragen nicht reflektiert oder mindestens keine Anstrengungen unternommen, diese zu beantworten. Beispielsweise wird den Jugendlichen mit Hilfe der Gasgesetze auf verschiedenste Weise nahegelegt, dass Luft beliebig verdünnt werden kann. Dass die Hauptbestandteile Stickstoff und Sauerstoff sind, ist ihnen ebenfalls gut bekannt. Warum fragt sich jedoch praktisch niemand, was zwischen den offensichtlich weit auseinanderliegenden Molekülen ist und weshalb diese nicht zusammenfliessen? Legt unsere Ausbildung zuviel Gewicht auf Formeln und zuwenig auf das Verständnis von Vorgängen? Dieses Verständnisdefizit wird im Laufe des Lebens vielfach durch Falschinformationen aufgefüllt und es erstaunt deshalb nicht, dass ein erschreckend grosser Prozentsatz unserer Stimmbürger lieber an Märchen glaubt, als sich an wissenschaftliche Fakten zu halten.

Fritz Gassmann