

Der Luftballon wird heiß und kalt

Was heißt eigentlich Erklären bzw. Verstehen im naturwissenschaftlichen Unterricht?

D. Plappert

Beobachtungen so zu schärfen, dass die entscheidenden Phänomene genau beschrieben werden, ist die grundlegendste Kompetenz jeder Naturwissenschaft. Beim Beobachten sind wir mit dem Beobachteten in direktem Kontakt. Manchmal geschieht das schnell und oberflächlich. Wir sind oft auf Antworten bzw. Erklärungen fixiert. Für jede naturwissenschaftliche Vorgehensweise ist von fundamentaler Bedeutung, Beobachtung und Erklärung sorgfältig zu unterscheiden. Eine Erklärung hat den Charakter einer Interpretation. Sie sind abhängig u. a. von der persönlichen Vorgeschichte, den persönlichen Fähigkeiten und Anliegen und auch von der gegenwärtigen Kultur. Es gibt gewisse Spielräume. In einem bestimmten Alter sind Kinder oft mit „weil halt“ als Erklärung zufrieden. Ist das ehrlicher als viele der heute üblichen Erklärungsmuster, an die wir uns gewöhnt haben, ohne sie wirklich zu verstehen? Mit dem Beispiel der Temperaturänderung beim schnellen Spannen und Entspannen eines Luftballons wollen wir der Frage: „Was heißt eigentlich Erklären bzw. Verstehen im naturwissenschaftlichen Unterricht?“ nachgehen. Dieses Phänomen eignet sich, da es im üblichen Physikunterricht selten behandelt wird, wir selbst also über wenig „verdunkelndes Vorwissen“ verfügen und so einen freieren Blick auf uns selbst und unsere Fragestellung haben können.

1 Das Grundphänomen

Führen Sie den in Abbildung 1 beschriebenen Versuch in den angegebenen drei Teilschritten durch und versuchen Sie, eine Erklärung der beobachteten Phänomene zu finden. Erst dann sollten Sie weiterlesen! Falls Sie keinen Luftballon zur Hand haben, „Wasserbomben“ sind sehr preiswert und geeignet.

Mögliche Beobachtungen: In Schritt 1 ist eine Temperaturzunahme, in Schritt 2 eine Abkühlung in Richtung Umgebungstemperatur und in Schritt 3 eine Abkühlung unter die Umgebungstemperatur festzustellen.

Oft wird dieser Versuch statt mit einem Luftballon mit einem Gummiband durch-

Eine „Luftballonaufgabe“

Versuch Schritt 1

- Ziehe den Luftballon schnell und kräftig auseinander, halte dann den gespannten Luftballon sofort an deine Lippe und fühle die Temperatur.
- Beschreibe deine Beobachtung kurz!



Versuch Schritt 2

- Spanne den Luftballon und bewege deine Hände so durch die Luft hin und her, dass Luft an dem Ballon vorbeiströmen kann. Dies soll etwa eine Minute dauern.
- Halte den gespannten Luftballon wieder an deine Lippe und fühle die Temperatur. Lass den Luftballon bis zum nächsten Versuchsteil weiterhin gespannt.
- Beschreibe deine Beobachtung erst nach Schritt 3 kurz!

Versuch Schritt 3

- Lass nun schlagartig den gespannten Luftballon sich entspannen. Halte den entspannten Luftballon sofort an deine Lippe und fühle die Temperatur.
- Beschreibe deine Beobachtung von Schritt 2 und 3 kurz!

Frage 1

Hat dich etwas an deinen Beobachtungen überrascht? Wenn ja, beschreibe und begründe kurz!

Erklärung

Wie kannst du dir das Beobachtete erklären? Beschreibe es kurz!

Abb. 1: Standardisiertes Aufgabenblatt

geführt. Beim Luftballon sind die Temperaturunterschiede deutlicher fühlbar und durch den in Abbildung 2 dargestellten Versuchsaufbau einer Temperaturmessung zugänglich: Innerhalb des Luftballons ist mit einem Kabelbinder ein kleiner Temperatursensor befestigt, der an ein Messwertfassungssystem bzw. an eine Temperaturanzeige angeschlossen ist. Beim schnellen Spannen steigt die angezeigte Temperatur schnell an; beim Entspannen sinkt die Temperatur deutlich unter Zimmertemperatur, vorausgesetzt, der gespannte Luftballon wurde zuvor auf Zimmertemperatur gekühlt.

Warum ist das so? Wie können wir die Temperaturzu- und -abnahme erklären?

2 Erklären heißt verbinden

„Erkläre mir, wie ich zum Freiburger Münster komme!“ Vor der Beantwortung dieser Frage muss das „Vorwissen“, müssen die „Präkonzepte“ ermittelt werden. Handelt es sich um eine Person, die mit unserer heutigen mitteleuropäischen Kultur vertraut ist, die mit dem Zug am Hauptbahnhof ankommt, dann genügt es anzugeben: „Vom Bahnhofsvorplatz immer geradeaus, durch Straßen und Gassen, über die Straßenbahnschienen hinweg und dann die nächste Gasse nach links. Dann stehst du direkt vor dem Münster!“ Kommt die Person aus dem indonesischen Regenwald das erste Mal in ihrem Leben in der „zivilisierten Welt“, am Freiburger Flug-

platz an, dann würde ich sie direkt dort abholen und mit ihr zusammen den Weg gehen, da es wohl keine Möglichkeit gibt, das „Neue“ mit dem „Alten“ zu verbinden. Erklären heißt, das Unbekannte mit dem Bekannten zu verbinden. Beim Erklären sind entscheidende Fragen: „Worauf können wir das „Neue“ bauen?“ und „Welche Möglichkeiten und Fähigkeiten bringt der Adressat für den „Aufbauvorgang“ mit?“ Beim Unterrichten ist das von Kind zu Kind individuell sehr verschieden. Es hängt u. a. vom Alter, vom Entwicklungsstand und den ganz persönlichen Vorerfahrungen ab.

Bevor im Folgenden verschiedene Erklärungsmuster des Luftballonversuchs dargestellt werden, wollen wir zunächst vorhandene Erklärungsmuster („Präkonzepte“) darstellen, die wir durch die Befragung von etwa 200 Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen ermittelt haben.

3 Das „Setting“

Im Kindergarten, in der Grundschule, in verschiedenen Klassenstufen des Gymnasiums, mit Physikreferendaren wurde der Luftballonversuch mit der am Ende des Beitrags angefügten „Arbeitsanweisung“ durchgeführt. Abb. 1 zeigt hieraus einen Ausschnitt. Immer wurde der Versuchsablauf von dem Versuchsleiter vorgeführt und erklärt, im Kindergarten und in der Grundschule ohne Arbeitsblatt. Der Luftballonversuch ist für solche Befragungen wegen seiner einfachen Durchführbarkeit sehr geeignet.

Hier seien einige zentrale Ergebnisse dargestellt: Fast alle Befragten sind über die Temperaturerscheinungen erstaunt, in

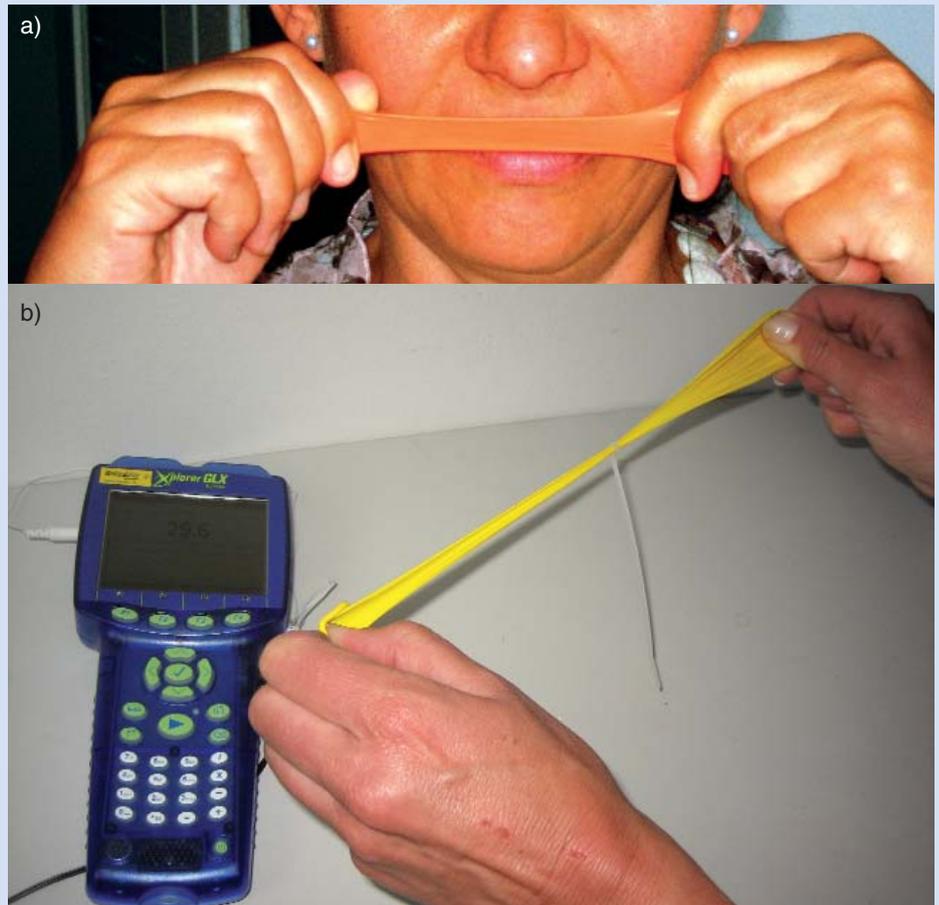


Abb. 2: Der Luftballon wurde schnell gespannt, die Temperatur gefühlt (a) und gemessen (b).

jüngerem Alter besonders, dass die Temperatur steigt. Mit zunehmendem Alter erstaunt immer mehr, dass die Endtemperatur unter die Ausgangstemperatur sinkt, dass der Luftballon wie eine Art Kühlschrankschrank wirkt. In jüngerem Alter besteht kein Bedürfnis nach einer Erklärung. Die Phänomene erscheinen interessant, ma-

gisch. In einem Gespräch wurde im Kindergarten in einem Sitzkreis formuliert: „Beim Spannen wird der Luftballon heiß, er wirkt wie eine Heizung. Bewegt man den gespannten Luftballon durch die Luft, wird er gekühlt, die Wärme geht raus. Entspannt er dann schlagartig, dann fehlt ihm die Wärme, deshalb wird er kalt!“

Abb. 3: Betrachten wir die beiden dargestellten Situationen, so wird augenfällig, dass die gut vorstrukturierte, dem Lebensraum der Kinder fremde Luftballonaufgabe zwar Spaß macht. Allerdings werden die stundenlang mit den Wasserschlauch beschäftigten Kinder sich vielfältigere Grundlagen für den später einsetzenden naturwissenschaftlichen Unterricht aneignen konnten, z.B. für die Bildung der Begriffe „elektrische Stromstärke“, „elektrische Spannung“, „elektrische Energie“ und „elektrischer Widerstand“. Dank an die Kinder und Erzieherinnen des städtischen Kindergartens in Freiburg-Vauban



Erklärung: Wie kannst du dir das **erklären**, was du beobachtet hast. Beschreibe es kurz:
 Der Luftballon wird warm, weil man durch das Auseinanderziehen die Dichte des Luftballons verringert und durch die Reibung der Moleküle Entropie entsteht.
 Kühlt ab weil die Dichte sich beim Entspannen erhöht.

Erklärung: Wie kannst du dir das **erklären**, was du beobachtet hast. Beschreibe es kurz:
 Für die Erwärmung des Luftballons kommt für mich nur die Reibung der Atome in Frage.
 Dass der Luftballon dann wieder abkühlt kann ich mir nicht wirklich erklären.

Erklärung: Wie kannst du dir das **erklären**, was du beobachtet hast. Beschreibe es kurz:
 Beim Auseinanderziehen fühlt man dem Material ~~Entropie~~ Energie zu. Diese wird kurz darauf auf erzeugte Entropie umgedadelt. Es wird also Entropie erzeugt - man erhält den Gefühlsindruck "warm".
 Wartet man nun eine Weile, so kommt es zum Entropieausgleich, Entropie strömt weg. Zieht sich der Ballon nun wieder zusammen, ist weniger Entropie pro Volumen als vorher - der Ballon fühlt sich kalt an.

Erklärung: Wie kannst du dir das Beobachtete **erklären**? Beschreibe es kurz:
 Die Energie, die durch das Auseinanderziehen in die einzelnen "Weder" (Moleküle) gesteckt wird, äußert sich durch eine Erwärmung, nachdem die Schwelle zum Spannen überschritten wurde.
 Beim Entspannen findet der umgekehrte Prozess statt, das tritt in einer Abkühlung äußert.

Abb. 4: typische Antwort von 3 Kursstufenschülern und am Ende eines Referendars

4 Typische Erklärungsmuster

Durch die Befragung der etwa 200 Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen schälten sich die typischen Erklärungsmuster heraus:

Kindergartenkinder freuten sich über die „Zauberei“, waren jedoch, wie schon erwähnt, nicht weiter an Erklärungen interessiert. **Schüler in der 4. und 7. Klasse** waren über die Temperaturerhöhung erstaunt, stellten viele Vermutungen an und begannen von sich aus, Fragen zu stellen. **Schüler höherer Klassen, wie auch die Referendare** versuchten ihr Vorwissen zur Erklärung heranzuziehen: „Durch Reibung entsteht beim Spannen Wärme bzw. Entropie. Deshalb nimmt die Temperatur zu.“ Die Temperaturabnahme blieb meist vage bzw. weitestgehend unerklärt. Die Reibungsvorstellung stellt, wie wir später sehen werden, ein Lernhindernis dar, um die Temperaturabnahme zu erklären (Abb. 4). Die Verwendung einer Teilchenvorstellung erschien oft als eine Art „Fluchtbewegung“. Einige der befragten Schüler der Kursstufe hatten in der Sekundarstufe I den Entropiebegriff kennengelernt und

auch die Tatsache, dass Entropie zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden kann. Auffällig war, dass viele Schüler sehr sachkundig versuchten, mit diesen Begriffen den Versuch zu verstehen. Da eine Temperaturabnahme meist mit einer Entropieabnahme verknüpft ist, vermuteten viele, dass beim Entspannungsvorgang Entropie irgendwie mit der Energie zusammen den Luftballon verlässt. Bemerkenswert ist auch der Vergleich der Antworten dieser Schüler mit den Antworten von Physikreferendaren, die den Entropiebegriff zwar im Studium, aber noch nicht in ihren Fachsitzungen behandelt hatten: Trotz des 5- bis 6-jährigen Studiums erschienen die Antworten der Referendare oft „hilfloser“. Nur einer der 15 befragten Referendare erreichte denselben „physikalischen Kern“ wie die Kinder im Kindergarten: „Beim Wedeln in der Luft wird Wärme des Luftballons an die Umgebung abgegeben. Lässt man ihn dann zusammenschnurren, ist das der inverse Ablauf wie am Anfang: Der Luftballon besitzt nun weniger Wärmeenergie/Entropie und ist daher kälter als die Umgebung.“ Diese Tatsache belegt eine

bekannte Beobachtung, dass die physikalische Begrifflichkeit während des Studiums bei den Studierenden nicht „festgewachsen“ ist.

5 Schrittweises Erklären des Luftballonversuchs – Reibung als Lernhindernis

Im Folgenden soll zunächst schrittweise der „physikalische Kern“ der Erklärung des Luftballonversuchs herausgearbeitet werden. Erst danach werden fachdidaktische Umsetzungsmöglichkeiten erörtert.

Das Erstaunliche ist, dass die Temperatur beim Entspannen unter die Umgebungstemperatur sinkt. Dies ist mit den im Alltag gewonnenen Reibungserfahrungen nicht zu verstehen. Nur der Temperaturanstieg beim ersten Schritt könnte damit erklärt werden, die Temperaturabnahme in der zweiten Phase jedoch nicht. Wäre die Reibung entscheidend, käme es auch hier zu einer Temperaturerhöhung. Wenn wir den Luftballon mehrmals hintereinander schnell spannen und entspannen, so messen wir, dass die Temperatur immer beim Entspannen sinkt, dass die Temperaturen insgesamt jedoch steigen. Damit wird klar, dass Reibung zwar vorhanden ist, aber auch bei der Temperaturzunahme beim Spannen nur ein untergeordneter Effekt sein kann.

Fazit

Die Temperaturänderung beim Spannen und Entspannen eines Luftballons ist nicht als Reibungsphänomen zu erklären.

6 Gibt es dieses Phänomen noch an anderer Stelle?

Oft hilft es beim Verstehen, wenn wir ähnliche Effekte an anderer Stelle betrachten. Gesucht ist also ein Beispiel, bei dem ein mechanischer und ein thermischer Effekt gekoppelt sind. Dies ist bei der Kompression und der Expansion eines Gases der Fall. Beim Aufpumpen eines Fahrradreifens wird die Pumpe warm. Hierbei handelt es sich weniger um ein Reibungsphänomen als vielmehr um ein dem Spannen und Entspannen des Luftballons verwandtes Phänomen, das im Idealfall auch „umkehrbar“, also „reversibel“ ist: Die Temperatur einer Kartusche eines Gaskochers sinkt im Betrieb bei der Expansion des Gases. Dies kann durch den in Abbildung 5 dargestellten Versuch nachvollziehbar gemacht werden: Luft wird in einer Arztspritze, die in jeder Apotheke erhältlich ist, komprimiert bzw. expandiert. Ein Thermosensor ist durch die Tülle eingeführt, die mit dem Daumen verschlossen wird. Beim schnellen Komprimieren steigt die Tempe-



Abb. 5: Temperaturänderungen, gemessen bei der Expansion und Kompression von Luft in einer Arztspritze.

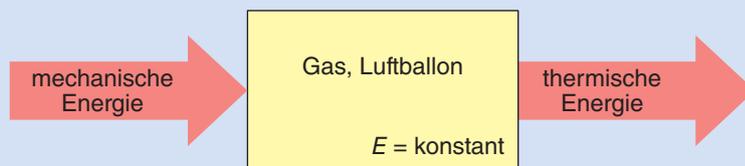


Abb. 6: Die mechanische Energie wird nicht im gespannten Luftballon bzw. komprimierten Gas gespeichert, sondern verlässt den Energiespeicher beim Speichern als thermische Energie.

atur, beim schnellen Expandieren sinkt sie wieder in Richtung Ausgangstemperatur. Wie beim Spannen und Entspannen des Luftballons liegt hier ein im Idealfall reversibler Vorgang vor, bei dem ein mechanischer und ein thermischer Effekt gekoppelt sind und der nicht durch Reibung erklärt werden kann.

Fazit

Bei beiden Phänomenen steigt die Temperatur durch Drücken bzw. Spannen. Bei der Umkehrung des Versuchs kann die Temperaturzunahme rückgängig gemacht werden. Beide Phänomene sind keine Reibungserscheinungen.

7 Können wir mit Energiebetrachtungen die Temperaturänderungen erklären?

Zum Spannen des Luftballons und zur Kompression des Gases wird Energie benötigt. Beim Spannen einer Feder ist das ebenso. Der gespannte Luftballon, das komprimierte Gas und die gedehnte Feder sind Energiespeicher. In allen drei Fällen steht die durch das Spannen bzw. durch die Expansion zugeführte Energie im Idealfall wieder vollständig zur Verfügung. Das Spannen und Entspannen der Feder ge-

schieht ohne Temperaturänderung. Die Energiespeicherung bei Luftballon und Gas unterscheidet sich damit erheblich von der Energiespeicherung bei der Feder.

Erstaunlich ist, dass beim Luftballon und beim Gas während des Energiespeicherns thermische Energie „entsteht“, nach außen abfließt und im Idealfall beim Entspannen bzw. bei der Expansion wieder zurückfließt und vollständig zur Verfügung steht. Dies zeigen exakte Messungen bzw. physikalische Überlegungen. Es entsteht so die paradoxe Situation, dass vor dem Speichern und nach dem Abrufen der Energie der Energiegehalt des Energiespeichers selbst, also die Energie des Luftballons bzw. des Gases, konstant bleibt und nicht zunimmt. Die Energiespeicherung geschieht im „Wärmespeicher“ außerhalb. Dies muss bei innovativen Druckluft-Speicherkraftwerken in Salzbergwerken berücksichtigt werden, an deren Entwicklung zurzeit intensiv geforscht wird (siehe Kasten 1).

Fazit

Beim Spannen des Gummis bzw. Komprimieren des Gases wird im Idealfall die zugeführte Energie vollständig als thermische Energie abgegeben. Beim Entspannen

des Gummis bzw. der Expansion des Gases wird diese dann wieder von „Außen“ als thermische Energie aufgenommen. Luftballon und Gas erscheinen als „Energie-wandler“ mit angekoppelten Wärmespeichern.

6 Erste Zwischenbilanz

Fassen wir unseren momentanen Erkenntnisstand zusammen:

- Luftballon und Gas können im Idealfall als „reversible Energiespeicher“ angesehen werden.
- In beiden Fällen sind mechanische und thermische Energie gekoppelt. Beim Speichern verlässt die zugeführte Energie das System als thermische Energie; beim Entladen fließt die benötigte Energie als thermische Energie wieder hinzu.
- Beide Vorgänge sind im Idealfall reversibel, d. h. umkehrbar.
- Die Temperatur des Luftballons bzw. des Gases steigt beim schnellen Spannen, da die thermische Energie nicht schnell genug abfließen kann. Umgekehrt sinkt die Temperatur beim schnellen Entspannen, da die benötigte thermische Energie nicht schnell genug nachströmen kann.
- Kurzgefasst entspricht dies der im Gespräch mit Kindergartenkindern formulierte Erklärung: „Beim Spannen wird der Luftballon heiß, er wirkt wie eine Heizung. Bewegt man den gespannten Luftballon durch die Luft, wird er gekühlt, die Wärme geht raus. Entspannt er dann schlagartig, dann fehlt ihm die Wärme, deshalb wird der Luftballon kalt!“
- Mit den in den Bildungsstandards von Baden-Württemberg in der Sekundarstufe I [1] geforderten Begriffen: „Die beim Spannen zugeführte Energie wird als thermische Energie abgegeben. Erfolgt das nicht schnell genug, steigt die Temperatur des Luftballons bzw. des Gases kurzzeitig an. Beim Entspannen bzw. Expandieren wird mechanische Energie abgegeben, die als thermische Energie von „Außen“ in den Luftballon, bzw. in das Gas fließt. Geschieht das nicht schnell genug, dann nimmt die Temperatur des Luftballons bzw. des Gases zunächst ab.“

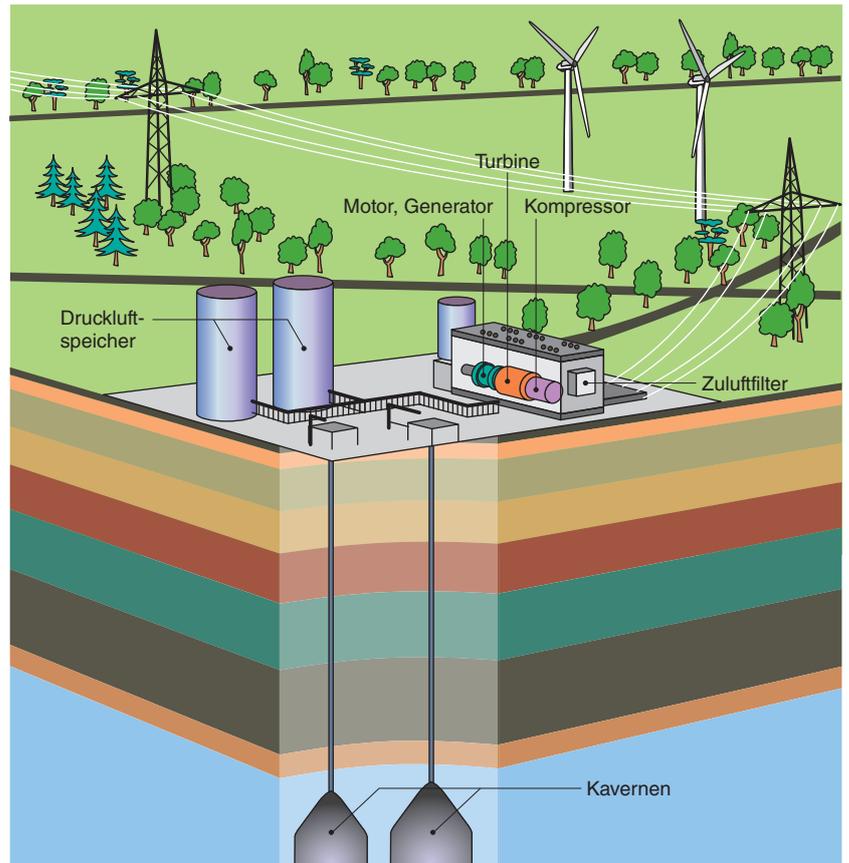
Fazit

Wir haben nun viel über Hintergründe des Luftballonversuchs erfahren. Haben wir den Luftballonversuch nun vollständig verstanden? Sind noch Fragen offen? Entscheiden Sie selbst!

Adiabatischer Druckluftspeicher

In neukonzipierten adiabatischen oder isentropischen Druckluftspeichern durchläuft die beim Verdichten erhitzte Druckluft, bevor sie in ausgedienten Salzbergwerken gespeichert wird, einen mit Röhren durchzogenen, keramischen Wärmespeicher und heizt diesen auf. Bevor die Druckluft später in die Turbine geleitet wird, durchströmt die Luft erneut diesen keramischen „Kachelofen“ und wird dabei mit der eigenen, vorher abgegebenen Wärme vorgeheizt. An der Entwicklung der hierzu benötigten hitzebeständigen Keramikspeicher und besonders der Kompressoren wird zurzeit geforscht. Sie müssen Betriebstemperaturen von 620 °C bis 650 °C langfristig standhalten.

Bis 2013 soll das Druckluftspeicherkraftwerk mit einer Leistung von 1000 MW in Betrieb gehen. Voll aufgeladen soll der Druckluftspeicher fünf Stunden lang 200 MW elektrische Energie liefern und dabei einen Wirkungsgrad von 70 % erreichen. Um die Netzspannung bei regenerativer elektrischer Vollversorgung stabil zu halten, geht man von einem Bedarf von 20-30 Anlagen in Deutschland aus. Ideal ist, dass die Salzstockfelder in Nord- und Mitteldeutschland geographisch nah an den größten der zukünftigen Windparks liegen.



Kasten 1: Adiabatische Druckluftspeicher

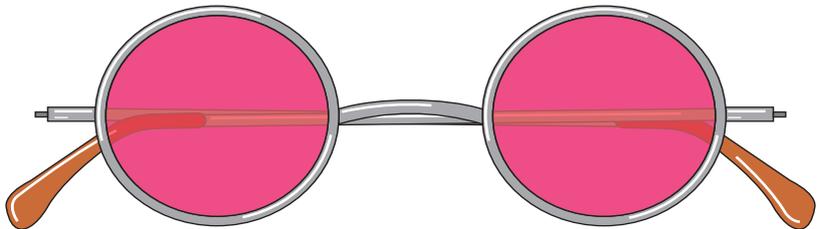
9 Die drei Bilder des physikalischen Entropiebegriffs

„Warum kommt es im Gegensatz zu einer Metallfeder beim Spannen bzw. beim Komprimieren zu den beobachteten Temperaturänderungen?“ „Woher kommt die thermische Energie?“ „Warum wird die zugeführte Energie nicht im Speicher selbst gelagert, sondern nach „außen“ abgegeben?“ Um Fragen dieser Art zu klären, reicht der Energiebegriff alleine nicht aus. Wir müssen dazu einen Schritt tiefer in die Thermodynamik eindringen, wie dies auch von den Bildungsstandards von Baden-Württemberg (Gymnasium) [1] für die Klassenstufen 9 und 10 gefordert wird.

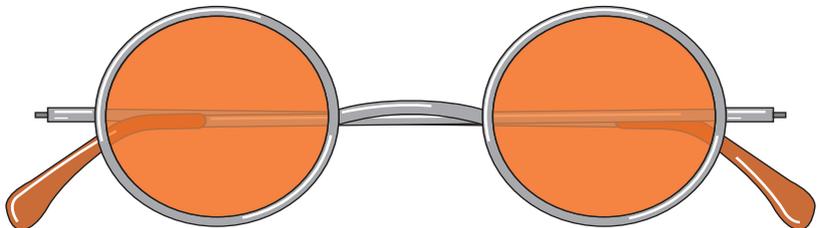
In der Thermodynamik steht neben der Energie die Entropie als zweite Größe im Zentrum. Sie spielt dieselbe Rolle wie die elektrische Ladung in der Elektrizitätslehre oder der Impuls in der Mechanik. Den Entropiebegriff benötigen wir, um weiterzukommen. Historisch haben sich drei verschiedene Zugänge zur Entropie gebildet, der „phänomenologische“, der „statistische“ und der „informationstheoretische“. Alle drei Zugänge sind physikalisch gleichwertig. Besonders die ersten beiden werden an Schule und Hochschule gelehrt. Beide sollen nun auf einem Niveau umrissen werden, das am Ende der Sekundarstufe I erreicht werden kann. Mehr dazu in [2].

Abb.7: Die drei physikalischen Entropiebegriffe als Begriffs-Billen

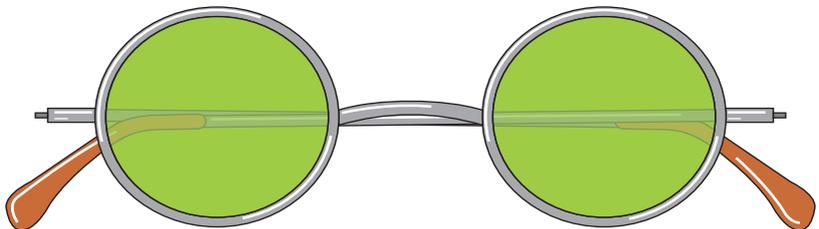
phänomenologische Thermodynamik



statistische Thermodynamik



informationstheoretische Thermodynamik



10 Der „phänomenologische“ Entropiebegriff

Der „phänomenologische“ Entropiebegriff ist wie Temperatur, Druck oder Energie ein makroskopischer Begriff. Durch Vergleich mit verwandten Erscheinungen und Begriffen kann er veranschaulicht werden. Deshalb sollen nun zunächst die physikalischen Begriffe kurz umrissen werden, die am Gymnasium in Baden-Württemberg in den Klassen 7 und 8 gebildet werden sollen. Auf sie soll dann später der Entropiebegriff aufgebaut werden:

- Energie strömt immer mit einer zweiten Größe zusammen.
- In Abbildung 8 strömt Energie von einer Pumpe mit Wasser zu einem Wassergenerator und dann mit Elektrizität weiter zu einem Motor, der einen Propeller antreibt. Wasser und Elektrizität spielen die Rolle eines „Energieträgers“. Sie werden selbst nicht „verbraucht“, sondern fließen beide im Kreis. Sie sind nur für den Energietransport zuständig.
- Die unterschiedlichen Eigenschaften der Energie und der Trägergröße werden immer an den Stellen deutlich, an denen die Energie und der Träger unterschiedliche Wege nehmen, also an Pumpe, Wassergenerator und Motor: Die Energie fließt längs der Anordnung von der Pumpe zum Wassergenerator und dann zum Elektromotor. Wasser und Elektrizität bzw. elektrische Ladung fließen im Kreis.
- In Abb. 9 wird Energie mit dem Energieträger Wasser zusammen gespeichert. Hier ist es schwer, Energie und Träger zu differenzieren. In einem „Pumpspeicherkraftwerk“ ist umso mehr Energie gespeichert, je höher der „Wasser“-Füllstand, bzw. der Druck am Boden des oberen Gefäßes ist. Die gespeicherte Energie befindet sich nicht im Wasser selbst, sondern im Gravitationsfeld der Erde. Beim „Entladen“ wird sie dann im Wassergenerator vom Wasser abgeladen, fließt, von dort von Elektrizität getragen, zum Motor, der dann den Propeller antreibt.

Soweit das „Alte“, nun zum „Neuen“, zu den Wärmephänomenen:

Was wir im Alltag „Wärme“ nennen, bedeutet physikalisch oft thermische Energie, die mit der Entropie als zweite Größe zusammen strömt. Die Entropie ist der Energieträger der thermischen Energie. Weil sie meist zusammen fließen, sind Energie und Entropie schwer zu unterscheiden. Es gibt nur wenige Beispiele, bei denen sich die Wege von Energie und Entropie trennen. Das in Abb. 10 abgebildete

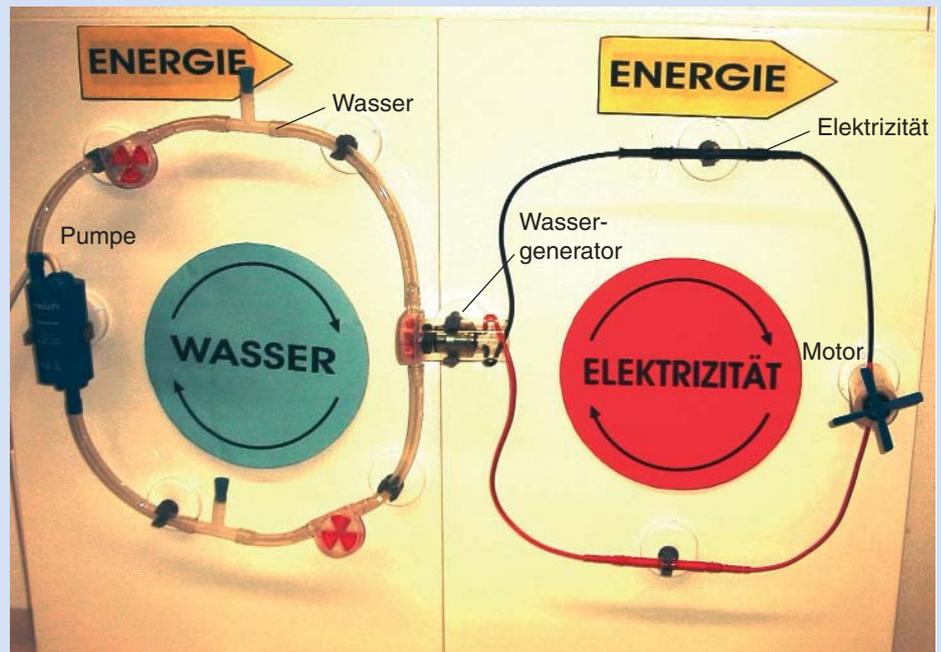
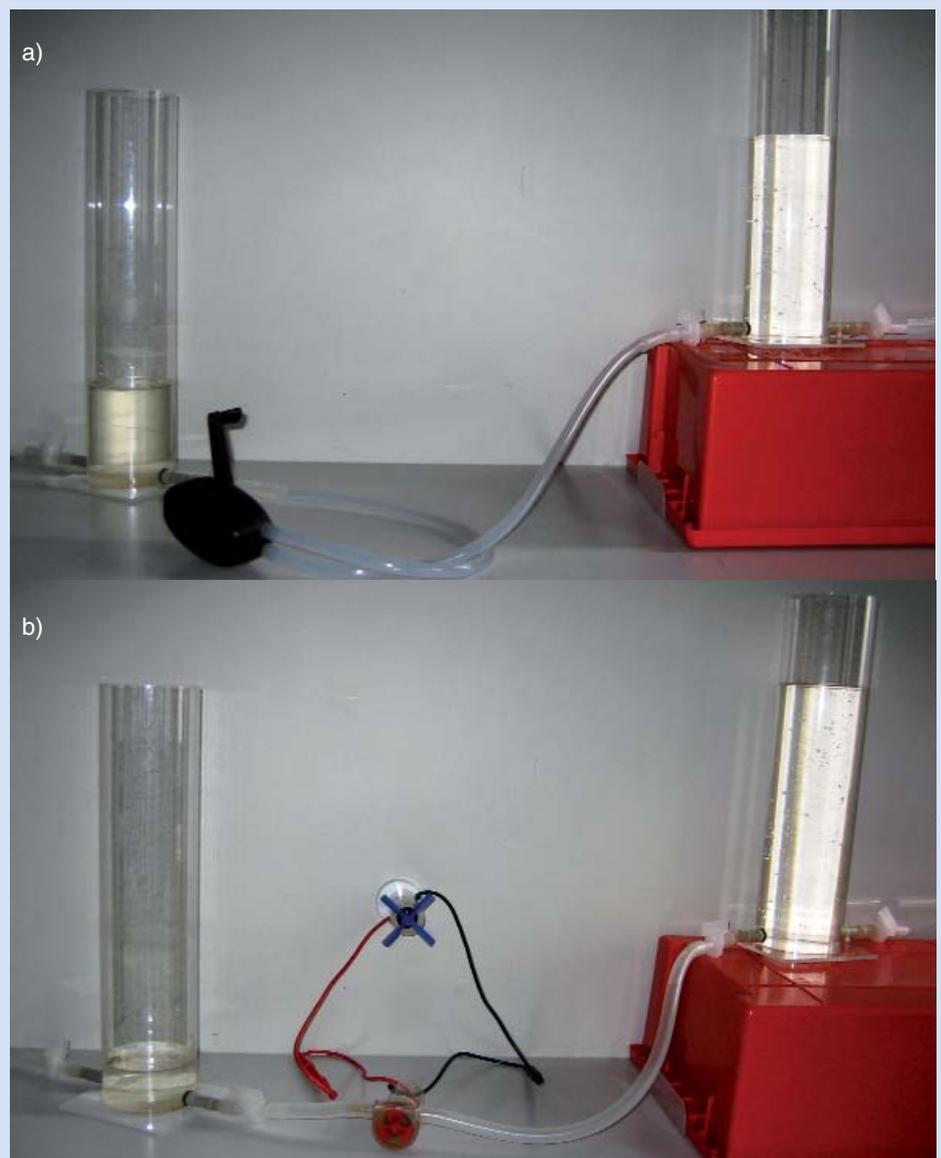


Abb. 8: Der Energie-Trägerstromkreis [3]

Abb. 9: Durch das Pumpen des Wassers wird die Energie gespeichert (a), die später den Wassergenerator antreibt (b), siehe [3].



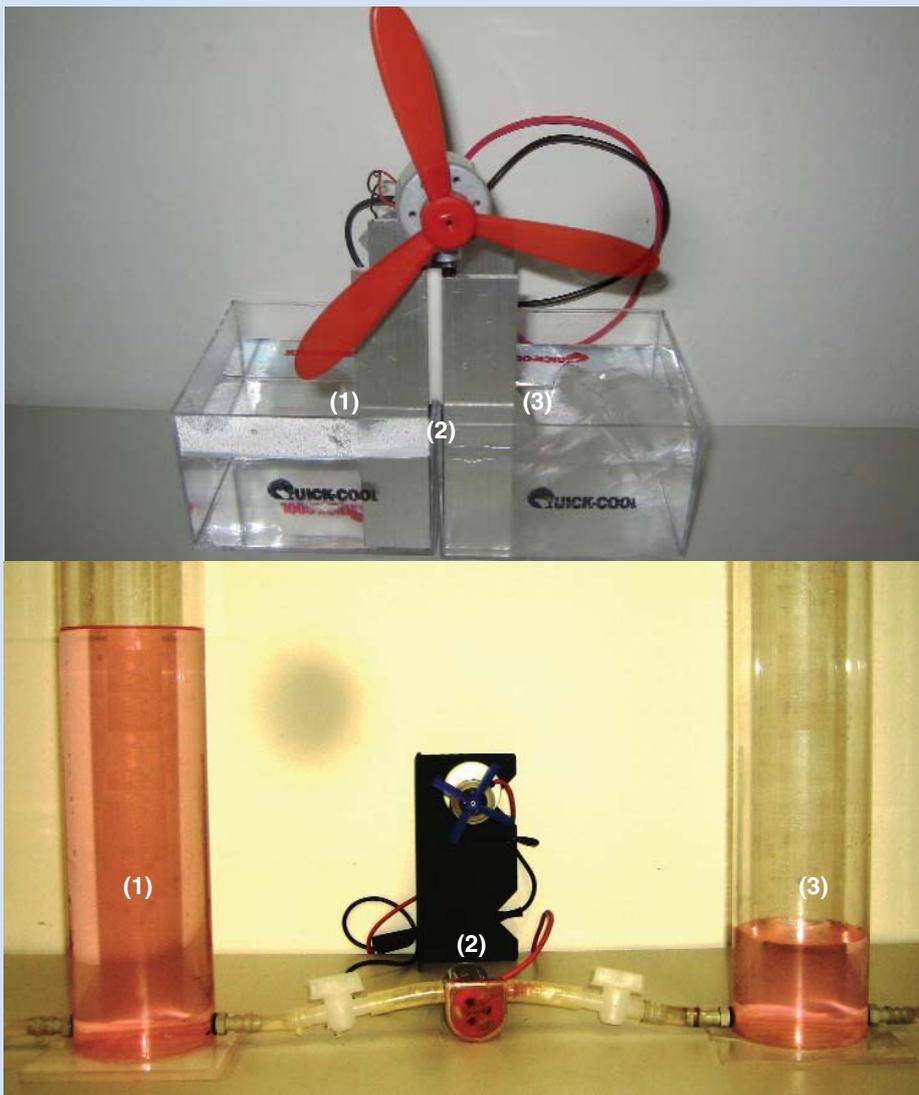


Abb. 10: thermisches Kraftwerk und Wasserkraftwerk [3]

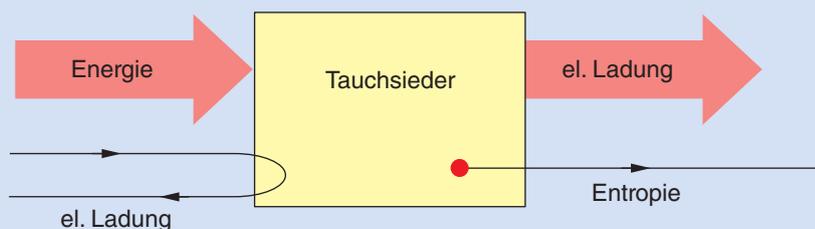


Abb. 11: Im Tauchsieder wird Entropie erzeugt.

thermische Kraftwerk ist ein solches: Hier strömt die Entropie von Behälter (1) mit hoher Temperatur durch ein „Thermoelement“ (2) in den Behälter (3) tiefer Temperatur hinein. Dabei sinkt die Temperatur in Behälter (1) und steigt in (3). Zum Vergleich das Wasserkraftwerk daneben. Hier entspricht die „Wasser“-Füllhöhe bzw. der Druck in den Behältern der Temperatur: Das Wasser strömt von Behälter (1) mit hohem Füllstand/Druck durch den „Wassergenerator“ (2) in den Behälter (3) mit kleinem Füllstand/Druck. Dabei sinkt der Füllstand/Druck in Behälter (1) und steigt in (3). So wie ein Behälter mit hohem Füllstand/Druck mehr Wasser enthält, so ent-

hält ein Behälter mit hoher Temperatur mehr Entropie. Die Temperatur ist also eine Art „Entropie“-Füllstandsanzeige. Wie im thermischen Kraftwerk aus Abb. 10 fließt die Entropie in allen thermischen Kraftwerken (Kohle-, Gas-, Kernkraft- und Solarkraftwerken) von hoher zu tiefer Temperatur und wird anschließend durch Kühltürme oder durch eine Flusskühlung an die Umwelt abgegeben. In Klimaanlage und Kühlschränken pumpen „Wärmepumpen“ die Entropie gegen ein Temperaturgefälle, so wie in Abb. 9 Wasser gegen ein Druckgefälle gepumpt wird. Die aus dem Zimmer bzw. Kühlfach weggepumpte Entropie verschwindet nicht einfach: Sie

muss auf der Rückseite des Kühlschranks bzw. außerhalb des Hauses abgegeben werden. Entropie kann nicht vernichtet werden. Die Entropie hat aber eine eigenartige Eigenschaft: Obwohl bei einem Tauchsieder (Abb. 11) dauernd Entropie heraus strömt, fehlt sie an keiner Stelle, keine Stelle wird kalt. Diese Erscheinung können wir nur verstehen, wenn wir bereit sind zu akzeptieren, dass Entropie im Tauchsieder aus dem Nichts heraus erzeugt wird. Reiben wir mit den Händen, „entsteht Wärme“, wir erzeugen Entropie. Entropie kann also erzeugt, dann aber nicht wieder vernichtet werden. Die Entropieerzeugung hat also nur eine Richtung, sie ist irreversibel. Das ist der tiefere Grund dafür, dass viele Prozesse in unserem Leben eine Richtung haben und nicht wieder rückgängig gemacht werden können; z. B. eine Kerze brennt nie „rückwärts“. Die beim Verbrennungsprozess erzeugte Entropiemenge ist vorhanden und kann nicht ohne Weiteres wieder verschwinden [2].

Fassen wir das Wichtigste kurz zusammen

- Entropie ist neben der Energie die zweite zentrale Größe bei allen Wärmeerscheinungen.
- „Wärme“ als Wort der Alltagssprache bedeutet meist Energie, die mit Entropie zusammen strömt. Deshalb kann „Wärme“ sowohl für thermische Energie als auch für Entropie stehen.
- Entropie kann strömen, kann also Energie tragen, kann in Körpern gespeichert werden.
- Je mehr Entropie in einem Körper enthalten ist, desto höher ist seine Temperatur. Die Temperatur ist eine Art „Entropie-Füllstandsanzeige“.
- Entropie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Nimmt sie an einer Stelle ab, muss es eine andere Stelle geben, an der sie zunimmt.
- Bei allen Reibungsvorgängen wird Entropie erzeugt.
- Das Besondere an reversiblen Vorgängen ist, dass hier keine Entropie erzeugt wird; das ist der tiefere Grund, warum sie umkehrbar sind.

11 Erklärung des „Luftballonversuchs“ mithilfe des „phänomenologischen Entropiebegriffs“

Nun wollen wir versuchen die Temperaturänderung beim Spannen bzw. Entspannen des Luftballons mithilfe des „phänomenologischen Entropiebegriffs“ zu erklären.

- Da es sich im Idealfall um einen reversiblen Vorgang handelt, wird keine Entropie erzeugt.

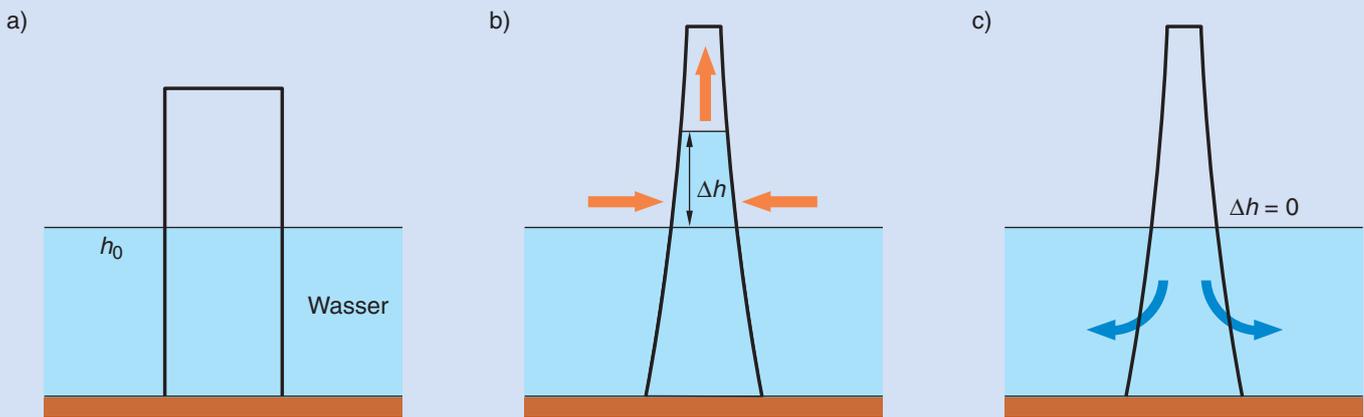


Abb. 12: Ein elastischer Wasserbehälter (a) wird gespannt. Zunächst steigt der Füllstand (b), bis sich wegen der porösen Behälterwände der Druckausgleich einstellt. Beim plötzlichen Entspannen sinkt der Füllstand zunächst.

- In Phase 2 des Luftballonversuchs wird Entropie zusammen mit der thermischen Energie abgegeben. Da der Versuch reversibel abläuft, wurde keine Entropie erzeugt. Die beim Abkühlen abgegebene Entropie muss vorher im Luftballon gesteckt haben. Beim Entspannen in Phase 3 wird sie später wieder benötigt.
- Beim Spannen steigt die Temperatur, ohne dass die Gesamtentropie des Luftballons größer wird. Im Vergleich zum entspannten Zustand steigt also der „Entropie-Füllstand“, ohne dass Entropie hinzukommt. Durch das Spannen „passt“ also nicht mehr so viel Entropie in den Luftballon hinein, seine Entropiekapazität sinkt. Die in Abb. 12 dargestellte „Wasseranalogie“ soll dies veranschaulichen: Bei einem wassergefüllten, dehnbaren Gefäß verringert sich beim Dehnen seine Querschnittsfläche (b) und damit auch seine Wasserkapazität. Durch das schnelle Dehnen steigt der „Wasser-Füllstand“ bzw. der Druck im Behälter. Es dauert einige Zeit, bis das gestiegene Wasser durch die porösen Wände nach „außen“ geströmt ist. Analog verringert sich beim schnellen Spannen des Luftballons seine Entropiekapazität. Beim schnellen Spannen steigt der „Entropie-Füllstand“, d. h. die Temperatur, da die „überschüssige“ Entropie nicht schnell genug nach „außen“ strömen kann.
- Fachlich ausgedrückt: Durch das Spannen des Gummis verringert sich seine „Entropiekapazität“, wie die „Wasserkapazität“ sich beim Dehnen des Wasserbehälters verkleinert, wie sich beim Auseinanderziehen eines Plattenkondensators dessen elektrische Kapazität verkleinert, wie sich beim Komprimieren eines Gases dessen Entropiekapazität verkleinert.

Fazit

Beim Spannen des Luftballons bzw. beim Komprimieren des Gases nimmt die Entropiekapazität ab, („es passt nicht mehr so viel Entropie hinein“). Die „überschüssige“ Entropie führt zu einer Temperaturerhöhung, sodass entropiegetragene Energie als thermische Energie nach außen abfließen kann. [4]

12 Die Umkehrung des Luftballonversuchs

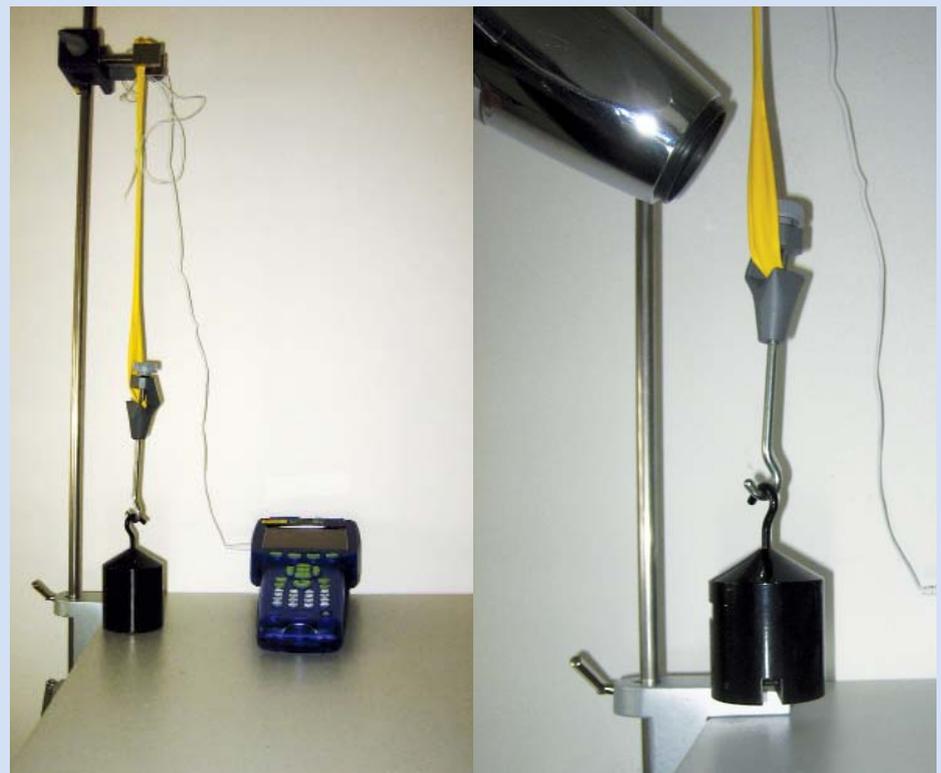
Um zu prüfen, wie tragfähig diese Erklärung ist, wollen wir versuchen, mit ihr die Umkehrung des Luftballonversuchs zu verstehen. In Abb. 13 hängt ein Körper an einem Luftballon. Vergrößern wir die Temperatur des gespannten Luftballons mit ei-

nem Fön, so verringert er seine Länge und zieht dabei den Körper hoch. Der Fön „füllt“ Entropie in den Luftballon. Die Temperatur steigt gewaltig (bis etwa 60°C). Wenden wir die „Wasseranalogie“ an: Wir füllen analog in den kompressiblen Wasserbehälter eine große Wassermenge. Der Druck steigt gewaltig. Dies kann dazu führen, dass die Wände des Wasserbehälters auseinandergedrückt werden und der Wasserbehälter sich wieder „verkürzt“ (Abb. 14).

Fazit

Die Wasseranalogie trägt: Wird der Luftballon mit Entropie gefüllt, zieht er sich zusammen, sein Fassungsvermögen für Entropie, seine „Entropiekapazität“ wächst.

Abb. 13: Wird die Temperatur des Luftballons durch einen Fön vergrößert, zieht er einen Körper hoch.



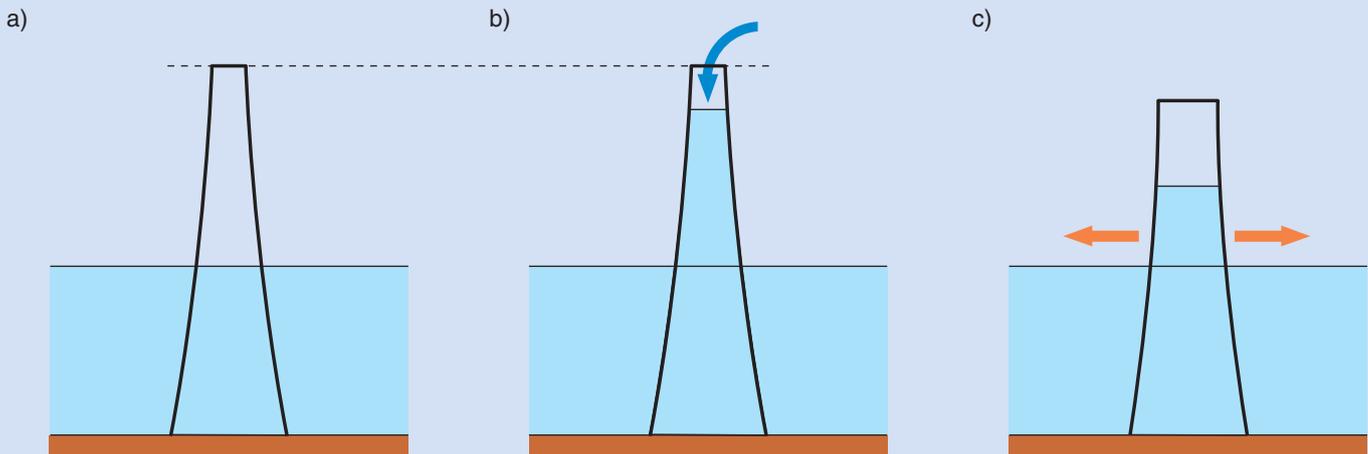


Abb. 14: In den gedehnten Wasserbehälter (a) wird eine große Wassermenge gegeben, der Druck steigt (b); der Wasserbehälter wird auseinandergedrückt und verkürzt sich dabei (c).

Anmerkung

Ändern wir die Temperatur des Luftballons immer wieder auf das Neue, so erhalten wir eine thermische Kraftmaschine, für die wie für alle thermischen Kraftwerke gilt: „Nur mit heiß und kalt – geht’s halt!“ [2] Unter dem Stichwort „Rubber Band Heat Engine“ sind bei YouTube interessante Realisierungen dieses Prinzips zu finden.

13 Zweite Zwischenbilanz

Fassen wir unseren „Erklärungsstand“ zusammen:

- Beim Spannen nimmt das Fassungsvermögen des Luftballons für Entropie ab. „Es passt bei derselben Temperatur nicht mehr so viel Wärme hinein“. Da die überschüssige Entropie nicht schnell genug nach außen strömen kann, nimmt die Temperatur des Luftballons zunächst zu.
- Beim Bewegen des Luftballons in der Luft strömt Entropie nach außen, die Temperatur des Luftballons sinkt in Richtung Umgebungstemperatur.
- Beim Entspannen nimmt das Fassungsvermögen des Luftballons für Entropie zu. „Es passt bei derselben Temperatur wieder mehr Wärme hinein“. Da die benötigte Entropie nicht schnell genug von außen hineinströmen kann, nimmt die Temperatur zunächst ab.

Anmerkung

Im umgangssprachlichen Zusammenhang kann zunächst auf die Differenzierung von thermischer Energie und Entropie verzichtet und die physikalische Bezeichnung „Entropie“ zunächst durch das alltagsprachliche Wort „Wärme“ ersetzt werden.

14 Der „statistische Entropiebegriff“

Es bleibt die Frage: „Warum verringert sich die Entropiekapazität beim Spannen des

Luftballons?“ Um diese Frage zu klären, müssen wir noch eine Etage tiefer in die Thermodynamik einsteigen, zum „statistischen Entropiebegriff“. Er ist Teil der statistischen Thermodynamik, mit deren Hilfe versucht wird, das Verhalten makroskopischer thermodynamischer Systeme durch das Verhalten seiner mikroskopischen Komponenten wie Elementarteilchen und daraus zusammengesetzter Systeme wie Atome und Moleküle zu erklären. Ein Mikrozustand ist klassisch gegeben durch die Angabe von Ort und Impuls der zum System zählenden Teilchen. Makroskopische Größen wie Temperatur und Druck werden durch das Bewegungsverhalten der „Teilchen“ erklärt: Je größer der mittlere Impuls der Teilchen ist, desto größer sind Temperatur und Druck. Die Entropie erscheint hier als ein Maß für die unter bestimmten makroskopischen Randbedingungen möglichen Zustände. Je größer die Entropie ist, desto mehr Zustände sind möglich, desto unbestimmter ist der mikroskopische Zustand, desto weniger Informationen sind über das Mikrosystem bekannt. Der „statistische Entropiebegriff“ kann nun anschaulich als ein Maß für die Unordnung eines Systems verstanden werden. Ein Problem dabei ist, dass erst durch makroskopische Messungen bzw. theoretische Überlegungen letztendlich entschieden werden kann, was „größere“ oder „kleinere“ Ordnung“ bedeutet. So kann es sein, dass die Entropie beim Lösen eines Salzes kleiner wird, obwohl man mit einer naiven Ordnungsvorstellung das Gegenteil erwarten würde (z. B. Calciumchlorid in Wasser). Im Folgenden sei nun ein Weg angedeutet, wie der „statistische Entropiebegriff“ in der Sekundarstufe I angebahnt werden kann:

- Im Chemieunterricht werden meist sehr frühzeitig die Erscheinungen der Stoffebene durch die Teilchenebene erklärt.

- Versuche zur Brown’schen Bewegung führen zur Vorstellung, dass die makroskopischen Größen Temperatur und Druck umso größer sind, je größer der mittlere Impuls der Teilchenbewegung ist.
- Versuche zur Diffusion (z. B. „Verteilung des Dufts von Parfüm im Raum“) bzw. zum Lösen von Stoffen (z. B. „Zucker im Kaffee“) führen zur Vorstellung, dass die Teilchen sich möglichst gleichmäßig im Raum verteilen. Diese Art von Vorgängen ist bekanntlich unumkehrbar, d. h. irreversibel.
- Entropie erscheint nun als ein Maß dafür, wie viele Verteilungsmöglichkeiten es in einem System gibt: Der Wert der Entropie ist umso größer, je mehr Verteilungsmöglichkeiten es gibt.
- Nach der Diffusion bzw. dem Lösen eines Stoffes gibt es mehr Verteilungsmöglichkeiten; deshalb ist hierbei die Entropie (bis auf Ausnahmen) größer geworden.
- Anschaulich bedeutet dies, dass Vorgänge „von allein“, also ohne Energiezufuhr ablaufen, wenn sich dabei die „Unordnung“, genauer die Entropie, vergrößert.

15 Warum sich die Entropiekapazität beim Spannen des Luftballons verringert

Unter dem Stichwort „Entropie-Elastizität“ ist in Wikipedia das in Kasten 2 Dargestellte zu finden. Wir entnehmen diesem Text:

- Gummi ist mikroskopisch betrachtet aus lang gestreckten „knäuelartig geformten“ Molekülketten aufgebaut.
- Beim Spannen „entrollen“ sich diese Knäuel, die Moleküle ordnen sich zunehmend parallel an.
- Dabei nimmt die statistische Verteilungsmöglichkeit ab, die Unordnung sinkt, der Wert der Entropie sinkt.

- Da Entropie nicht vernichtet werden kann, entsteht ein Entropieüberschuss, die Temperatur steigt, da die „überschüssige“ Entropie nicht schnell genug nach außen strömt.

Und zur Umkehrung:

- Durch die höhere Temperatur „verknäulen“ sich die Moleküle wieder, die Entropie des Luftballons nimmt zu und der Luftballon zieht sich zusammen.

Fazit

Durch diese statistische Vertiefung konnte die Erklärung der Entropiezunahme beim Spannen des Luftballons in der Teilchenebene gefunden werden. Dabei wird sowohl der phänomenologische Entropiebegriff („Entropie kann nicht vernichtet werden, die überschüssige Entropie muss nach außen strömen“) als auch der statistische Entropiebegriff („Bild der knäuelartigen Moleküle, die sich bei hoher Temperatur knäueln“) verwendet.

Anmerkung

Die Problematik der Übernahme makroskopischer Bilder wie „verknäulen“ in die Mikroebe ne soll hier nicht vertieft werden.

16 Der Luftballonversuch im Rahmen der naturwissenschaftlichen Bildung

„Warum wird ein Luftballon beim schnellen Spannen heiß?“ „Warum wird ein Luftballon beim schnellen Entspannen kalt?“ Die physikalische Erklärung ist, wie wir gesehen haben, sehr vielschichtig. Wenn wir nun daran gehen zu überlegen, wie die Erklärung in einem naturwissenschaftlichen Unterricht erfolgen könnte, müssen wir uns vergegenwärtigen, dass „naturwissenschaftliche Bildung“ bedeutet, ein „Individuum“ mit seinen jeweils vorhandenen Möglichkeiten und Fähigkeiten mit der „Naturwissenschaft“ als Kulturgut in Verbindung zu bringen. Zwei verschiedene Welten, das „Innen“ und das „Außen“ müssen miteinander zusammenwachsen [6].

Damit das gelingt, müssen wir uns vergegenwärtigen,

- welche Möglichkeiten und Fähigkeiten das Kind, der Jugendlichen bzw. der Erwachsenen mitbringt und
- worauf wir das „Neue“ aufbauen (Vorerfahrungen und Vorwissen) können.

Die Antworten darauf sind natürlich individuell verschieden. Wir wollen nun im Folgenden verschiedene Möglichkeiten skizzieren. Hierbei orientieren wir uns einerseits an der in Abb. 16 dargestellten Übersicht [6] und andererseits an den durch die

Bei Polymeren handelt es sich um sehr lange Kettenmoleküle. Entlang dieser Ketten sind die einzelnen Kettenelemente gegeneinander zu einem sogenannten *Polymerknäuel* verdrillen. Dieses Bestreben hat keine energetische Ursache, sondern ist lediglich das Resultat der in völlig zufällige Richtungen erfolgenden Drehbewegung entlang der Kette. Wird ein Polymer durch eine Zugspannung gedehnt, richten sich die Ketten daraufhin bevorzugt in Richtung der Belastung aus. Das Gummi wird also gedehnt. Sobald die Zugspannung entfällt, beginnen die Ketten wieder mit der zufälligen Drehbewegung, in deren Verlauf sie wieder die statistische Verteilung einnehmen und dabei sich wieder zusammenziehen. Dieser Effekt ist ähnlich einem Gas, das sich, einmal komprimiert, nach der Dekompression aufgrund der zufälligen Bewegung der Gasatome wieder in den neugewonnenen Freiraum ausdehnt. Es handelt sich dabei um einen entropischen Effekt, diese Form der Elastizität wird als *Entropie-Elastizität* bezeichnet.“

aus Wikipedia/Entropie-Elastizität

Kasten 2: Entropieelastizität [5]



Abb. 15: Naturwissenschaftlicher Unterricht bringt zwei verschiedene Welten miteinander in Kontakt.



Abb. 16: Naturwissenschaftliche Bildung vom Kinder- bis ins Erwachsenenalter [12]

Strecke ein dünnes Gummiband schnell und halte es gestreckt an die temperatur-empfindliche Oberlippe. Es wurde wärmer, aber nicht durch Reibung. Würden die Gummiteilchen aneinander reiben, so wäre das irreversibel. Ein gestrecktes Band würde sich nicht wieder von selbst zusammenziehen.

Halte das Band gespannt, bis es auf Zimmertemperatur abgekühlt ist. Prüfe nach dem Entspannen seine Temperatur. Sie liegt unter der Zimmertemperatur! Du hast die einfachste „Kühlmaschine“ in Händen. Wie funktioniert sie?

Vereinfacht gesehen bestehen komplizierte Gummimoleküle aus vielen Gliedern, wie Uhrketten. Diese hängen locker aneinander; die Gliederkette erzeugt für sich keine elastische Kraft. Doch tritt nun das Kleingewimmel in Aktion. Es verknäuel im entspannten Gummi alle Glieder und es gibt jedem Knäuel eine andere Form; die vielen Form-Möglichkeiten bedeuten viel „Form-Entropie“.

Zieht man das Gummiband in die Länge, so nehmen alle Moleküle etwa die gleiche, gestreckte Form an, sie müssen sich auf wenige Form-Möglichkeiten beschränken; die Form-Entropie sinkt drastisch. Die Gesamtentropie des Bandes kann aber auch hier nicht abnehmen; ein universelles Naturgesetz wäre verletzt. Deshalb weicht die Form-Entropie ins Kleingewimmel aus; dies erhöht die bereits bekannte (Wärme-)Entropie. Wärme fließt in deine Oberlippe und nimmt etwas von der Unordnung mit, die du den Gummimolekülen beim Spannen entzogen hast. Die zugehörige Wärme entsteht aber nicht von selbst, sondern wurde zuvor von dir mit der Spannkraft als Spannenergie geliefert.

Wenn du das Band loslässt, so verknäuel das emsige Kleingewimmel die Moleküle wieder. Die vorübergehend gehortete (Wärme-)Entropie kehrt wieder als Form-Entropie zurück. Das Band kühlt sich ab; es holt aus deiner Lippe Wärme und Entropie, Unordnung zurück. Du spürst die Entropie unmittelbar.

Kasten 3: Das Gummiband als Kältemaschine [7]

Im Folgenden soll mithilfe eines einfachen Modells Voraussagen über das Dehnungsverhalten eines Gummibandes gemacht werden. In diesem Modell hängt die Entropie des Gummibandes von der Temperatur und der Länge des Gummibandes ab. Im ungedehnten Ausgangszustand besitzt das Gummiband bei der Gummitemperatur T_0 die Länge l_0 . Das Modell liefert folgende Formel für die Änderung der Entropie S des Gummibandes zwischen dem ungedehnten Ausgangszustand l_0 und einem gedehnten Zustand mit Länge l_1 und Gummitemperatur T_1 :

$$S_1 - S_0 = 3K \ln\left(\frac{T_0}{T_1}\right) - K \left[\frac{1}{2} \left(\frac{l_1}{l_0}\right)^2 + \frac{l_0}{l_1} - \frac{3}{2} \right]$$

Hierbei ist $K = 0,10 \text{ J K}^{-1}$ eine Konstante. Die Temperaturen T_0 und T_1 werden in der absoluten Temperaturskala angegeben. Obige Formel ist gültig für $l_1 \geq l_0$.

Eine weitere Annahme dieses Modells ist, dass weder bei Längen- noch Temperaturänderungen des Gummibandes Entropie erzeugt wird.

Das Gummiband wird zunächst sehr langsam von $l_0 = 50 \text{ cm}$ auf $l_1 = 60,0 \text{ cm}$ gedehnt. Vor, während und nach diesem Vorgang besitzen das Gummiband und seine Umgebung die Temperatur $20,0^\circ\text{C}$. Die Gesamtenergie des Bandes ändert sich bei diesem Vorgang ebenfalls nicht.

1. Beschreiben und berechnen Sie mithilfe obigen Modells, wie sich bei diesem Vorgang die Entropie und Energie des Bandes und der Umgebung verändern.
2. Bestimmen Sie die mechanische Energie, die notwendig ist, um das Band $l_0 = 50 \text{ cm}$ auf $l_1 = 60,0 \text{ cm}$ zu dehnen.
3. Wird eine ideale Stahlfeder gedehnt, dann wird die dazu benötigte Energie in der Feder gespeichert. Vergleichen Sie dies mit dem Dehnungsverhalten des Gummibandes bei sehr langsamer Dehnung.

In einem weiteren Versuch wird das Gummiband sehr schnell von $l_0 = 50 \text{ cm}$ auf $l_1 = 60,0 \text{ cm}$ gedehnt. Dieser Vorgang geschieht so schnell, dass kein Austausch von thermischer Energie mit der Umgebung möglich ist. Vor der Versuchsdurchführung hat das Gummiband die Temperatur $20,0^\circ\text{C}$.

4. Berechnen Sie mithilfe obigen Modells die Temperatur T_1 des Gummibands nach diesem Vorgang.

Kasten 4: Mögliche Abituraufgabe

Voruntersuchungen („Luftballonaufgabe“) gewonnenen Erkenntnissen.

16.1 Die Zeit vor dem Einsetzen des naturwissenschaftlichen Unterrichts

Die Kinder freuen sich über die „Zauberei“, das „Unerwartete“. Sie sind jedoch nicht an einer Erklärung interessiert. „Sie befinden sich noch im Regenwald und sind dort gut aufgehoben!“ Falls der Luftballonversuch jedoch behandelt werden sollte, weil vielleicht ein Kind die Frage mitbringt oder weil in der Grundschule „Versuchsbeschreibung“ thematisiert wird, kommt es auf die klare Trennung von Beobachtung und Erklärung an. In diesem Alter sollten die Kinder lernen, die Beobachtungen und Zusammenhänge in einer „sachlichen“, von ihrer Person losgelösten Weise schriftlich und mündlich darzustellen. „Beim Spannen wird der Luftballon warm, er wirkt wie eine Heizung. Bewegt man den gespannten Luftballon durch die Luft, wird er gekühlt. Entspannt er dann schlagartig, wird er kalt, wie ein Kühlschrank.“ Eine mögliche Erklärung für dieses Alter: „Wird der gespannte Luftballon durch die Luft bewegt, verliert er Wärme. Diese fehlt ihm dann nach dem schnellen Entspannen, deshalb wird der Luftballon zunächst kalt!“ Anzumerken bleibt aber, dass diese Art der Versuche, die völlig losgelöst sind von der Lebenswelt der Kinder, ihnen nicht das vermittelt, was sie in diesem Alter brauchen (Abb. 3).

16.2. Die Zeit vor der Kursstufe

Hier sollten sinnstiftende Kontexte Ausgangs- und Endpunkte von naturwissenschaftlichen Überlegungen sein. Beim zurzeit erfolgenden Übergang zur regenerativen Energie ist die Entwicklung kostengünstiger und effektiver Energiespeicher eine der vordringlichsten Aufgaben. Adiabatische Druckluftspeicher sind hierfür eventuell geeignet. Nachdem ihr Aufbau und ihre Funktionsweise geklärt sind, tritt die Frage nach dem Sinn der „Wärmespeicher“ in das Bewusstsein. Nun könnten der Luftballonversuch und der Kompressions-Expansionsversuch mit der Arztspritze sinnvolle Einstiegsversuche für Schülerinnen und Schüler sein. Die Temperatur beim Luftballonversuch kann zunächst mit den Lippen, dann bei Luftballon und Gas mit dem Thermosensor gemessen werden. Je nach Aufbau des Unterrichtsgangs wird dann der Bezug zum Energie- und Entropiebegriff hergestellt und je nach Ziel und Eindringtiefe mit dem „phänomenologischen Entropiebegriff“ oder zusätzlich noch mit dem „statistischen Entropiebegriff“.

griff“ verbunden. Für diese Erklärungen müssen, wie zuvor dargestellt, viele Begriffe und Konzepte erarbeitet worden sein, um das „Neue“ mit dem „Alten“ verbinden zu können. Deshalb kann es sinnvoll sein zu überlegen, ob entweder auf den phänomenologischen oder auf den statistischen Entropiebegriff verzichtet werden sollte. Wie problematisch es ist, mit dem „statistischen Entropiebegriff“ allein die Luftballonaufgabe zu lösen, zeigt der Text, der einem in Baden-Württemberg eingeführten Physikbuch für die Klassen 9 und 10 entnommen [7] ist. So bleiben Sätze wie „Wärme fließt in deine Oberlippe und nimmt etwas von der Unordnung mit, die du den Gummimolekülen beim Spannen entzogen hast“ oder „Du spürst die Entropie unmittelbar.“ unbestimmt. Bedenklich ist außerdem, dass Beobachtung und Erklärung sowie Stoff- und Teilchenebene nicht klar getrennt erscheinen und dass Begriffe der makroskopischen Welt mit anthropomorphen Zusätzen wie „emsig“ oder „gehörtet“ in die Mikrowelt hineingedichtet werden.

16.3 In der Kursstufe

In den 4-stündigen Neigungskursen werden die physikalischen Begriffsnetze verstärkt quantitativ behandelt. In Kasten 4 ist eine mögliche Abituraufgabe dargestellt. Hierbei wird u. a. die Kompetenz „Rechnen mit unbekanntem Formeln“ überprüft. Diese Aufgabe kann ohne den statistischen, allein mit dem phänomenologischen Entropiebegriff gelöst werden. Teilaufgabe 1 und 2 verlangen, die Entropieabnahme S mit der vorgegebenen Formel zu berechnen. Mit der Formel $E = TS$ kann dann die umgesetzte Energiemenge zusätzlich berechnet werden. Der Vergleich von Gummi und Feder in Teilaufgabe 3 bezieht sich auf den Ort der Energiespeicherung: In der Feder geschieht sie innerhalb der Feder, beim Gummi außerhalb durch die beim Spannen abgegebene thermische Energie. Durch Teilaufgabe 4 wird die Fähigkeit der Anwendung von mathematischen Rechentechniken zur Lösung physikalischer Aufgaben überprüft. Die ausführliche Lösung und weitere Musteraufgaben sind unter [8] zu finden.

17 Und nun?

Wissen wir nun die Antwort auf unsere Ausgangsfrage: „Was heißt eigentlich Erklären bzw. Verstehen im naturwissenschaftlichen Unterricht?“ Wir haben hier zunächst schrittweise den „Kern der physikalischen Erklärung“ erarbeitet, um danach „fachdidaktische Überlegungen“ an-

zustellen, eine geeignete Erklärung des Versuchs für den jeweiligen „Adressaten“ zu erwägen.

Der „physikalische Kern“ sei abschließend so umrissen, dass er „gestuft“ im Unterricht behandelt werden kann und dass je nach gewünschter Eindringtiefe an der gewünschten Stufe haltgemacht werden kann.

1. Beim schnellen Entspannen sinkt die Temperatur, da die beim vorhergehenden Bewegen abgegebene „Wärme“ bzw. thermische Energie bzw. Entropie dem Luftballon fehlt und nicht schnell genug von „außen“ nachströmen kann.
2. Reibung kann beim schnellen Spannen bei Schritt 1 nicht der entscheidende Effekt für die Temperaturerhöhung sein, da sonst auch beim Entspannen in Schritt 3 die Temperatur steigen müsste.
3. Die Temperaturerhöhung beim Spannen kann mit dem gleichzeitigen Verkleinern des Fassungsvermögens für Entropie verstanden werden. Dazu stehen der „phänomenologische“ und der „statistische Entropiebegriff“ als zwei unterschiedliche Eindringstufen zur Verfügung.
4. Mithilfe des „phänomenologischen Entropiebegriffs“ kann durch Analogiebetrachtungen die Änderung der Entropiekapazität veranschaulicht werden, ohne in die Teilchenebene überzugehen.
5. Kommt der „statistische Entropiebegriff“ hinzu, kann die Änderung der Entropiekapazität durch Strukturänderungen der „Gummimoleküle“ verstanden werden.
6. Die verschiedenen Schritte können, wie die Abituraufgabe zeigt, auch quantitativ behandelt werden.

Es ist erstaunlich, wie vielschichtig die Erklärungsmuster des sehr einfach zu realisierenden Luftballonversuchs sind. Spannend ist bei der Befragung von Kindern, Jugendlichen oder Erwachsenen zu erleben, wie sie sich einerseits über die Temperaturveränderungen wundern, und andererseits, mit welchen Erklärungsmustern sie „zufrieden“ sind. Diese Beobachtung entspricht den Ergebnissen der Studie „von Einstellungen und Haltungen im naturwissenschaftlichen Unterricht“ [9]: „Das Staunen über die Natur und naturwissenschaftliche Phänomene (also die Bewunderungshaltung) ist bei den getesteten Schülerinnen und Schülern am stärksten ausgeprägt. Dieses Ergebnis ist sehr bedeutsam, da eine grundlegende

Begeisterung für die Natur die Voraussetzung für Neugierde und Durchhaltevermögen in den Naturwissenschaften ist. Die Formalisierungshaltung (also die Neigung zur Abstraktion) ist erwartungsgemäß am geringsten ausgeprägt. Dieser Befund bestätigt Annahmen früherer Studien und muss sicherlich auch als eine generelle Ursache für die Abneigung der Schülerinnen und Schüler gegenüber abstrakten Schulfächern wie z. B. Mathematik in Betracht gezogen werden.“ Sollten wir bei unserem Erklärungs Bemühen mit dem Blick auf die Möglichkeiten der Kinder und Jugendlichen nicht „bescheiden“ werden? *Gottfried Merzyn* [10] zitiert eine nationale und internationale Studie und kommt zu dem folgenden Ergebnis: „Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch, dass die meisten Haupt-, Real- und Gesamtschüler bis Klasse 10 mit solchem (formal-operationalen) Denken überfordert sind. Selbst der Umgang mit Proportionalitäten, einem der allerbescheidensten mathematischen Werkzeuge in den Naturwissenschaften, fällt etlichen noch in Klasse 10 schwer. Und auch am Ende des Gymnasiums und der amerikanischen High-School bereitet formal-operationales Denken vielen Schülern Probleme. Der Physik- und Chemieunterricht läuft mithin dauernd Gefahr, die Schüler intellektuell zu überfordern.“

Wäre es nicht pädagogisch sinnvoller und redlicher, sich zunächst mit einer geringeren Erklärungstiefe zu begnügen? Das bewusste Offenlassen von Teilfragen kann „das Fragen in Fluss halten, lebenslang, damit sich dann Schritt für Schritt Wissen aufbaut“ (*Donata Elschenbroich* [11]). Für mich selbst ist der Luftballonversuch ein Beispiel, wie ich immer wieder neues Wissen aufbauen konnte. Der Weg, eine Erklärung selbst zu finden, ist zwar mühselig, aber lohnenswert. Es geht nicht nur darum Schülerinnen und Schüler zu „forschendem Unterricht“ anzuleiten, sondern auch darum, als Lehrkraft selbst in eine „forschende Haltung“ über Alltagsphänomene zu gelangen. Dazu müssen wir aushalten lernen, auch den Schülerinnen und Schülern gegenüber, dass die Erscheinungen in der Welt oft so komplex sind, dass unsere Erklärungen meist nur Teilantworten sein können, sodass unsere Suchbewegung weiter aktiv bleibt. Das führt „nebenbei“ dazu, dass wir viel intensiver mit den uns umgebenden Phänomenen in Kontakt kommen und uns nicht vorschnell mit oft wissenschaftlich fragwürdig erscheinenden Erklärungsmustern von der Sache selbst abwenden. ■

Literatur

[1] Bildungsplan Baden-Württemberg Gymnasien, Physik:

unter www.bildungsstandards-bw.de

[2] Horst Petrich, Dieter Plappert und Heiner Schwarze: Entropielehre II – Energie und Entropie, Unterricht Physik Bd. 24, Aulis

[3] Aus der Analogieserie von Conatex, Postfach 1407, 66514 Neunkirchen, www.conatex.com

[4] Dank an meine Kollegen Daniel Bohn, Patrick Bronner, Horst Petrich, Roland Quenzel, Franz Kranzinger. Durch die vielen Gespräche wurde die hier beschriebene Wasseranalogie geboren.

[5] nach wikipedia „Elastomer“

[6] Dieter Plappert: „Alles klar! Der Sauerstoff verschwindet, das Wasser steigt!“ Irrwege und Wege der naturwissenschaftlichen Bildung vom Kindergarten- bis ins Erwachsenenalter; Praxis der Naturwissenschaft 4/61. Jg. 2012

[7] Dorn-Bader Physik Gymnasium 9/10; Schrödel Braunschweig, 2007, S. 203

[8] http://lehrerfortbildung-bw.de/faecher/physik/gym/fb2/modul1/2_muster/

[9] A. Schönborn, M. Kremer, T. Götz: Von Einstellungen und Haltungen im naturwissenschaftlichen Unterricht; MNU 65/5 (15.7.2012); Verlag Klaus Seeberger, Neuss

[10] G. Merzyn: „Naturwissenschaften, Mathematik, Technik – immer unbeliebter?; Schneider Verlag Hohengehren, Baltmannsweiler, 2008

[11] Donata Elschenbroich: „Weltwunder – Kinder als Naturforscher“, 2007 Wilhelm Goldmann

[12] Dieter Plappert: Naturwissenschaftliche Bildung vom Kindergarten bis zur Hochschulreife, PhiS 5/60 (2012)

Anschrift des Verfassers

Prof. Dieter Plappert, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung Freiburg, (Abt. Gymnasien), Oltmannsstraße 22, 79100 Freiburg; E-Mail: dieter@plappert-freiburg.de

Eine „Luftballonaufgabe“

Name: _____ Klasse: _____ Schule: _____

Mit einem Luftballon kann man viele verschiedene Dinge tun. Das, was wir hier nun mit dem Luftballon machen, wird vermutlich für die meisten von euch neu sein.

- Bitte führe die Versuche allein durch.
- Bitte fülle das Blatt alleine aus und gib es dann mit deinem Namen am Ende der Arbeitszeit ab. Wenn der Platz auf der Vorderseite nicht reicht, bitte auf der Rückseite weiter schreiben.

Versuch Schritt 1

- Ziehe den Luftballon schnell und kräftig auseinander und halte den gespannten Luftballon sofort an deine Lippe und fühle die Temperatur.
- Beschreibe deine **Beobachtung** kurz!



Versuch Schritt 2

- Spanne den Luftballon und bewege deine Hände so durch die Luft hin und her, dass Luft an dem Ballon vorbeiströmen kann. Dies soll etwa eine Minute dauern.
- Halte den gespannten Luftballon wieder an deine Lippe und fühle die Temperatur. Lass den Luftballon bis zum nächsten Versuchsteil weiterhin gespannt.
- Beschreibe deine Beobachtung erst nach Schritt 3 kurz!

Versuch Schritt 3

- Lass nun schlagartig den gespannten Luftballon sich entspannen. Halte den entspannten Luftballon sofort an deine Lippe und fühle die Temperatur.
- Beschreibe deine **Beobachtung** von Schritt 2 und 3 kurz!

Beobachtung Schritt 2:

Beobachtung Schritt 3:

Frage 1: Hat dich etwas an deinen Beobachtungen überrascht? Wenn ja, beschreibe und begründe kurz!

Erklärung: Wie kannst du dir das Beobachtete **erklären**? Beschreibe es kurz:

Frage 2: Wie fandst Du den Versuch? Begründe kurz!