

Abb. 2: Modell eines thermischen Kraftwerks mit einem Kondensator für einen geschlossenen Kreislauf (siehe [1]).

wobei P die Energiestromstärke bzw. Leistung, I_S die Entropiestromstärke, I_Q die elektrische Stromstärke, F die Impulsstromstärke (Kraft), I_n die Mengenstromstärke bedeuten.

Beide Gleichungen verdeutlichen, dass ein System nur durch eine Verbindung mit einer zweiten, mengenartigen Größe Energie austauschen kann. Die Abgrenzung der beiden Größen von der Energie stellt ein weiteres didaktisches Unterrichtsziel dar. Es werden die Zusammenhänge zwischen der Energie und der zweiten, mengenartigen Größe sorgsam herausgearbeitet und die wesentlichen Eigenschaften herausgestellt. Es gibt also die *Energieformen* in dem Sinne, dass die Energie „gleichzeitig“ auch die Eigenschaften der zweiten, mengenartigen Größe annimmt. Die Energiestromgleichung bildet den allgemeinen physikalischen Hintergrund des im Unterricht verwendeten „Energie-Träger-Konzepts“.

Die Onsager'sche Gleichung

Durch die Energiegleichung (3) wird allgemein ein Zusammenhang eines Stroms I_X einer extensiven Größen X oder eines materiellen Stoffsystems X mit dem Gradienten verschiedener intensiver Größen ΔA_k , oft als „Antriebe“ bezeichnet, beschrieben:

$$I_X = \sum_{k=1}^n L_{Xk} \Delta A_k \quad (3)$$

wobei der Koeffizient L_{Xk} den konkreten Zusammenhang des Stroms I_X mit den k unterschiedlichen Antrieben ΔA_k beschreibt.

Im Allgemeinen kann also ein Strom eines Stoffes *verschiedenen Antriebe zugleich* haben, z. B. ein Wasserstrom in einem Schlauch im Gravitationsfeld der Erde (Druckgradient, Gravitationsfeldstärke) oder thermoelektrische Ströme (Temperaturgradient, elektrische Feldstärke) ... Der einfachste Fall ist, wenn nur ein Gradient einer Größe ΔA_k vorkommt und L_{Xk} linear ist. Wir erhalten dann z. B. für den elektrischen Strom die Beziehung $I = 1/R \cdot U$. Derartige grundlegend einfache Zusammenhänge sind für den Anfangsunterricht Physik geeignet.

Die Onsager'sche Gleichung bildet den allgemeinen physikalischen Hintergrund des im Physikunterricht verwendeten „Strom-Antrieb-Widerstand-Konzepts“.

Zur Physik thermischer Kraftwerke

Im Prinzip sind alle thermischen Kraftwerke gleich aufgebaut: In einem Kessel wird Wasser verdampft, der Dampf treibt Turbinen an und wird im Kondensator kondensiert. Das dabei entstehende Wasser wird durch eine Speisewasserpumpe in den Kessel zurücktransportiert (siehe Abb. 1a und 1b).

Nur ein Teil der zugeführten Energie kann von der Turbine vom Dampf abgeladen werden. Das Verhältnis von genutzter zu zugeführter Energie wird üblicherweise der Wirkungsgrad genannt. Der Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken beträgt etwa 40 %, der von Kernkraftwerken etwa 30 %.

Die Überlegungen von *Sadi Carnot* führten zu der Überzeugung, dass der Wirkungsgrad nicht von der Druckdifferenz, sondern ausschließlich von der Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang der Turbine abhängig ist. *Carnots* Überlegungen sind in [5] dargestellt.

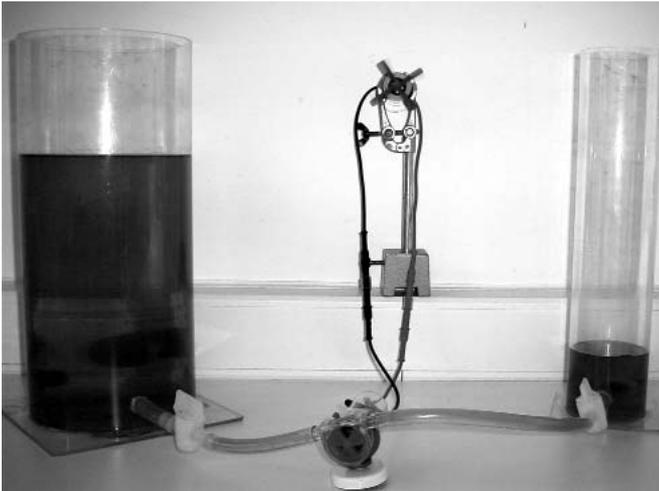


Abb. 11: Im Generator nimmt die Energie einen anderen Weg als das Wasser, sie strömt zum Lüfter.

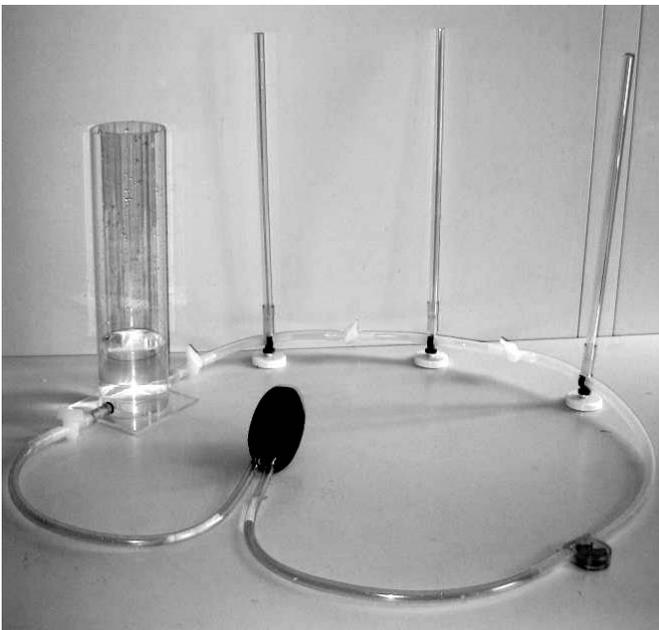


Abb. 12: Schülerübungen mit Wasserströmen [6]

Der Versuch verdeutlicht:

- Energie wird mit dem strömenden Wasser geliefert.
- Im Generator nimmt die Energie einen *anderen Weg* als das Wasser, sie strömt zum „Lüfter“, das Wasser in den anderen Behälter.
- Ist die Höhendifferenz, d.h., die *Druckdifferenz* zu klein, dann steht nicht mehr genügend *Energie* zur Verfügung, das Wasser kann nicht mehr genügend Energie liefern, die Drehung des Propellers kommt zum Erliegen.
- Mithilfe einer *Pumpe* kann Wasser „von Außen“ angetrieben werden, d.h., dem Wasser Energie zugeführt werden.
- Das Wasser strömt „von allein“ von *hohem zu tiefem Druck*.
- Es strömt, solange eine *Druckdifferenz* vorhanden ist.
- Die Druckdifferenz ist der *Antrieb* des Wasserstroms.

- Wasser kann mithilfe einer *Pumpe* als „äußerer Antrieb“ gegen die Druckdifferenz angetrieben werden.
- Die Stärke des Wasserstroms hängt von der Druckdifferenz und der Größe des *Strömungswiderstands* ab. Der Strömungswiderstand kann durch das Zudrehen der Hähne oder durch das Zudrücken des Silikon Schlauches vergrößert werden.
- An Stellen mit großem *Strömungswiderstand* wird viel *Energie* vom Wasser abgeladen; an Stellen mit großem *Antrieb* wird viel *Energie* auf das Wasser geladen.

3.7 Der thermische Energie-Träger-Stromkreis

Das Modul „thermischer Energie-Träger-Stromkreis“ (Abb. 13) kann bei einem vorhandenen Energie-Träger-Stromkreis statt des hydraulischen Stromkreises (Pumpe, Wassergenerator, Schläuche) eingebaut werden. Das linke Peltiermodul, das mit einem Netzgerät verbunden ist, wirkt als „Entropiepumpe“: Es treibt den Entropiestrom an, belädt ihn mit Energie. Dieser fließt dann durch die obere Heatpipe zu einem weiteren Peltiermodul. Dort wird die Energie von der Entropie abgeladen und mit der Elektrizität beispielsweise zum Lüfter gebracht.



Abb. 13: Der thermische Energie-Träger-Stromkreis

Die Entropie hingegen strömt dann vom zweiten Peltiermodul durch die untere Heatpipe zur „Entropiepumpe“ zurück. Analog der Hydraulik und der Elektrizitätslehre entsteht so ein Entropie-Stromkreis (Abb. 14).

Abb. 14: Der Energietransport mit Entropie

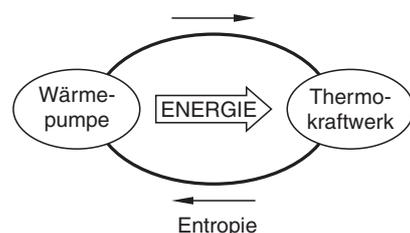




Abb. 15: Der Quick-Cool-ThermoSchülerSet [6]

Mithilfe dieses Moduls kann eine Vielzahl qualitativer und quantitativer Versuche im Demonstrationsexperiment durchgeführt werden.

Das Quick-Cool-ThermoSchülerSet (Abb. 15) ermöglicht dieselben Versuche im Schülerexperiment. Mithilfe beider Versuchsanordnungen kann u.a. verdeutlicht werden, dass Energie und Entropie unterschiedliche Wege nehmen, die Energie vom Netzgerät zum Propeller, die Entropie stattdessen im Kreis strömt.

3.8 Technische Realisierung und physikalische Eigenschaften

Den Schülerinnen und Schülern sind die Namen der Geräte, die für thermische Energietransporte eingesetzt werden, vielfach bekannt. Beispiele zum Thema Heizung wären: Ofen, Heizlüfter, Tauchsieder, Kochplatte, Ölheizung, Gasheizung, Wärmepumpe, Heizkraftwerk, auch Blockheizkraftwerk, auch andere Kraftwerke. Neben dem Heizen gehört auch das Kühlen zu den thermischen Energietransporten. Als Beispiele dazu seien genannt: Kühlschrank, Klimaanlage und auch der Kühler bzw. die Wasserkühlung im Kraftfahrzeug oder die Kühlung der Bauelemente eines Computers. Interessant erscheint auch der Wärmehaushalt von gleichwarmen und wechselwarmen Lebewesen.

Während die Schülerinnen und Schülern die Begriffe vielfach schon einmal gehört haben, in manchen Fällen auch eine Vorstellung von den zugehörigen Geräten und deren Funktionsweise haben, sind die physikalischen Eigenschaften eher Lerngegenstand des Unterrichts. Die umgangssprachliche Beschreibung der Geräteeigenschaf-

ten soll zu einer fachsprachlichen Beschreibung weiterentwickelt werden.

Was für die einzelnen Bauteile gilt, gilt für die Funktion von Baugruppen umso mehr. Um beispielsweise die Funktion eines thermischen Kraftwerks fachlich angemessen zu beschreiben, sollten die Eigenschaften des Wärmetauschers, der Turbine und des Kondensators bezüglich Temperatur, Entropiestrom und Energiestrom im Grundsatz bekannt sein. Um die Funktion einer Klimaanlage zu beschreiben, sollten die Eigenschaften einer Wärmepumpe bezüglich Temperatur, Entropiestrom und Energiestrom ebenfalls im Grundsatz bekannt sein. Unter einer fachlich angemessenen Beschreibung wird hier die quantitative Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge verstanden, die *wesentliche* Aspekte zutreffend beschreibt und randständige vernachlässigt.

Für die Konzeption des Unterrichts zu einer quantitativen Beschreibung von thermischen Energietransporten wird deshalb eine elementarisierte Beschreibung der beteiligten Bauelemente zur Grundlage gemacht. Diese soll Thema des Unterrichts sein. Erst wenn die Schülerinnen und Schüler mit den Eigenschaften sicher vertraut sind, können von ihnen quantitative Aussagen zu Kombinationen dieser Elemente oder zur Auswirkung von Parameteränderungen erwartet werden.

Eigenschaften der idealen Wärmepumpe

Als erstes Beispiel sei die ideale Wärmepumpe betrachtet. Wie Abb. 16 zeigt, fließt durch die Wärmepumpe ein Entropiestrom I_S . Der Entropiestrom fließt mit der Temperatur T_1 in die Wärmepumpe, hindurch und mit der

3 Didaktische Leitvorstellungen und Gesamtplanungsfeld

Temperatur T_2 wieder heraus. Mit der Elektrizität wird der Energiestrom I_{E1} aufgenommen, mit der Entropie der Energiestrom I_{E2} . Mit diesem Energiestrom ist der Entropiestrom in der Wärmepumpe „beladen“ worden.

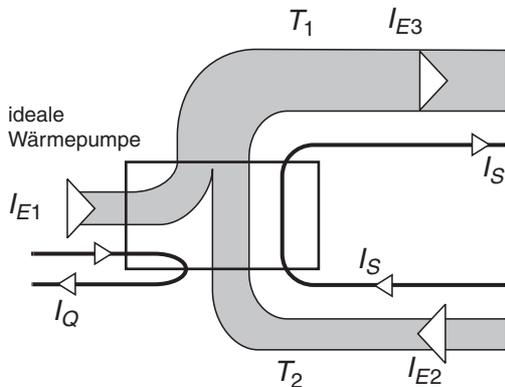


Abb. 16: Energieströme und Entropiestrom bei einer idealen Wärmepumpe. Charakteristisch: Der Entropiestrom ist konstant.

Für die ideale Wärmepumpe gilt: Der gesamte Zustrom an Energie und Entropie ist gleich dem Wegstrom.

Ideale Wärmepumpe

(Für die Energie 2 Eingänge, 1 Ausgang)

Z.B. Kühlschrank, Peltiermodul, technische Wärmepumpe

Temperatur: $T_1 > T_2$

Entropiestrom: I_S ist konstant und wird vom Entropieeingang mit T_2 zum Entropieausgang mit T_1 gepumpt.

Energiestrom:

aufgeladen $I_{E1} = (T_1 - T_2) I_S = \Delta T I_S$

hinein $I_{E2} = T_2 I_S$

heraus $I_{E3} = T_1 I_S$

Anmerkungen

Charakteristisch für jede Pumpe ist, dass Energie aufgeladen wird, für eine Wärmepumpe, dass sie auf die Entropie aufgeladen wird. Deshalb ist auch $T_1 > T_2$ für die Wärmepumpe gegeben.

Die Stärken der Energieströme sind qualitativ durch die entsprechende Breite der Strompfeile veranschaulicht (Abb. 16). Dabei wird deutlich, dass die Summe $I_{E1} + I_{E2}$ der hinströmenden Energie gleich der wegströmenden I_{E3} ist: eine Folge der Energieerhaltung, wenn keine Energie gespeichert wird.

Wärmepumpen können zum Heizen und zum Kühlen verwendet werden, abhängig davon, ob der Entropieeingang oder der Entropieausgang an den betrachteten Raum thermisch angekoppelt ist. Der Energiestrom I_{E2} in Abb. 16 ist mit dem Entropieeingang verbunden. Er entspricht im Falle der Kühlung dem Energiestrom („Kühlleistung“), der beim Kühlen dem Raum entzogen wird.

Der Energiestrom I_{E3} ist mit dem Entropieausgang verbunden. Das ist der Energiestrom, der bei einer Wärme-

pumpe zum Heizen eines Raumes genutzt werden kann („Heizleistung“).

Eigenschaften der Elektroheizung

Etwas einfacher als die Wärmepumpe ist die Elektroheizung zu beschreiben. Sie hat für die Energie nur einen Eingang und einen Ausgang (Abb. 17).

Der Zustrom von Entropie ist null, was daran zu erkennen ist, dass kein anderer Gegenstand Entropie abgegeben und dadurch seine Temperatur verringert hat. Hingegen wird hier Entropie erzeugt.

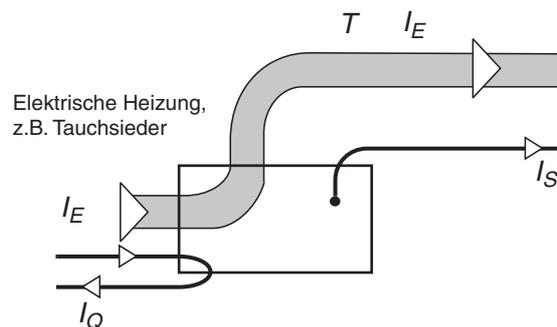


Abb. 17: Energiestrom und Entropiestrom bei einer elektrischen Heizung. Charakteristisch: Der Energiestrom ist konstant. Der Hinström der Entropie ist null. Der Wegstrom der Entropie wird erzeugt.

Elektroheizung (1 Eingang, 1 Ausgang)

Z.B. Heizlüfter, Tauchsieder

Temperatur am Entropieausgang: T

Entropiestrom:

hinein 0

heraus $I_S = I_E / T$ (erzeugt)

Energiestrom:

aufgeladen I_E (als Beispiel: $I_E = U I_Q$)

heraus I_E

Anmerkungen

Welches ist die Temperatur der Elektroheizung? Ist die des Heizelements gemeint oder die des Raumes, der letztlich damit geheizt werden soll? Die genannten Formeln treffen für beide Fälle zu. Bei der höheren Temperatur des Heizelements selbst ist der Entropiestrom I_S wegen $I_S = I_E / T$ noch gering. Im Raum mit der geringeren Temperatur verteilt, hat beispielsweise der Entropiestrom in den Raum hinein einen größeren Wert. Auf dem Weg vom Heizelement in den Raum und aus dem Raum heraus wird Entropie erzeugt.

Die Schülerinnen und Schüler rechnen jeweils mit Temperatur, die der Raum bzw. der Stoff hat, der erwärmt werden soll. Dieser hat die niedrigste Temperatur der Transportkette. Der Entropiestrom $I_S = I_E / T$ ist dann maximal, da T den kleinsten Wert annimmt.

Selbst bei „alten“ Elektroheizgeräten kann man davon ausgehen, dass der Zustrom an Energie *gleich* dem Wegstrom bleiben muss. Da die Energie nicht nennenswert

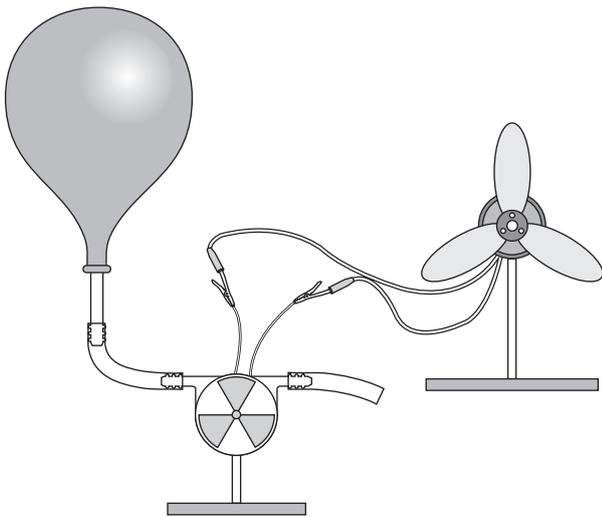


Abb. 2.1: Luft strömt von Stellen hohen Drucks zu Stellen niedrigen Drucks. Dabei kann mit einem geeigneten Bauteil Energie von der strömenden Luft „abgeladen“ werden.

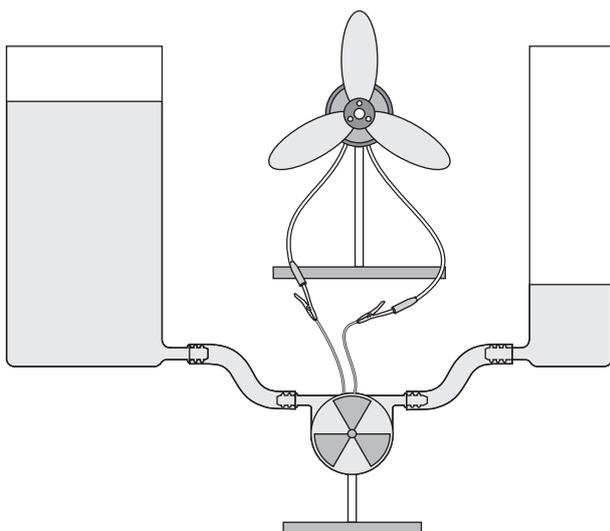


Abb. 2.2: Wasser strömt von Stellen hohen Drucks zu Stellen niedrigen Drucks. Dabei kann mit einem geeigneten Bauteil Energie vom strömenden Wasser „abgeladen“ werden.

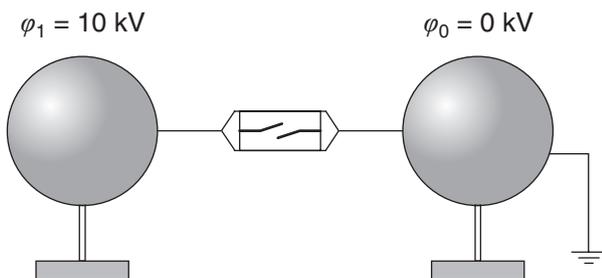


Abb. 2.3: Elektrizität strömt von Stellen hohen elektrischen Potentials zu Stellen niedrigen elektrischen Potentials. Dabei kann mit einem geeigneten Bauteil Energie von der strömenden Elektrizität „abgeladen“ werden.

Die Erklärungen bei den beiden Elektrizitätsversuchen bleiben, wenn die Elektrizitätslehre noch nicht behandelt worden ist, sehr rudimentär. Wurden im Unterricht an früherer Stelle schon Analogiebetrachtungen angestellt, so werden einzeln Schülerinnen und Schüler auch hier den analogen Aufbau der Versuchsanordnungen erkennen und entsprechende Interpretationen anbieten.

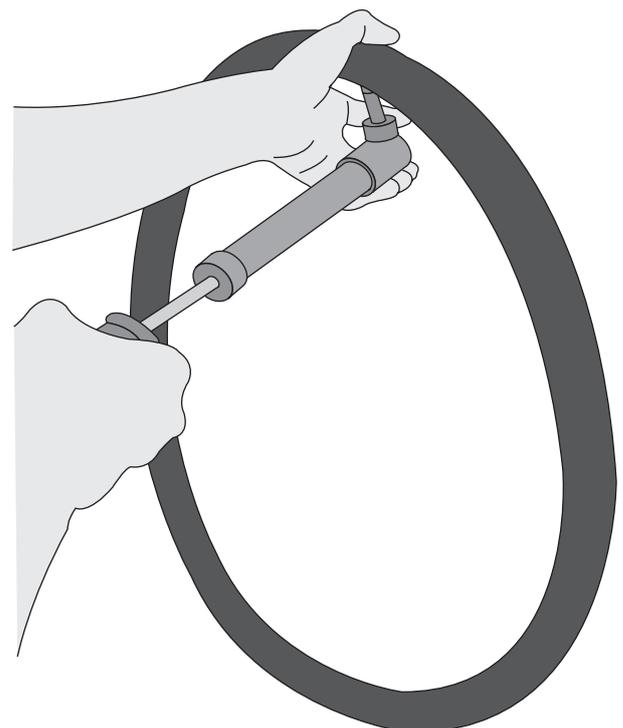
2. Schritt: Das „Strom-Antrieb-Konzept“

Nachdem die Versuche der Lernstationen (Abb. 2.4 bis Abb. 2.6) vorgestellt sind, kann z.B. in einem Lehrer-Schüler-Gespräch der analoge Aufbau der Versuche herausgearbeitet werden. Die Schülerinnen und Schüler können darauf hingewiesen werden, dass, obwohl bei den elektrischen Erscheinungen keine Strömung zu beobachten ist, das bei Luft und Wasser gebräuchliche Strömungsbild auch auf elektrische Erscheinungen angewendet wird. In allen drei Phänomenbereichen scheinen entsprechende Gesetzmäßigkeiten zu gelten:

- Jeder Strom benötigt einen Antrieb.
- Je größer der Antrieb ist, desto mehr strömt in derselben Zeiteinheit.
- Mit Pumpen kann ein Strom entgegen der Richtung, in der Wasser bzw. die Luft „von allein“ strömen, in Gang gebracht werden.

Je nach der zur Verfügung stehenden Zeit können nun die physikalischen Größen Wasserstromstärke, Luftstromstärke, Druck, Druckdifferenz, elektrisches Potenzial, elektrische Spannung im Unterricht mehr oder weniger ausführlich eingeführt werden, um die oben genannten Lernziele zu erreichen.

Abb. 2.4: Um Luft von Stellen niedrigen Drucks zu Stellen hohen Drucks zu bringen, braucht man eine Luftpumpe und Energie.



6.1.3A Lernstationen Strom-Antrieb

Station 1: Ein Luftantrieb

Material: 1 Luftballon mit angebrachtem Zweiwegehahn, 1 „Wassergenerator“ oder 1 Strömungswächter mit Schlauch, 1 Lüfter und Stativmaterial

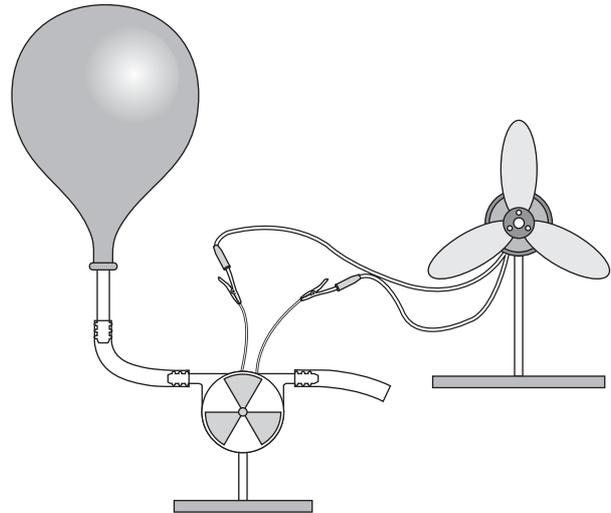
Aufgabe 1

Blase den Luftballon auf, schließe den Hahn und baue den abgebildeten Versuch auf. Öffne den Hahn und beobachte genau.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den von dir beobachteten Versuchsablauf. Beschreibe auch, was man am Drehen des Lüfters erkennen kann.

Vergleiche auch mit Station 3.



6.1.3B Lernstationen Strom-Antrieb

Station 2: Ein Wasserantrieb

Material: 1 Wasserbehälter mit Schlauchanschluss, 1 „Wassergenerator“ oder 1 Strömungswächter mit Schlauch, 1 Lüfter und Stativmaterial

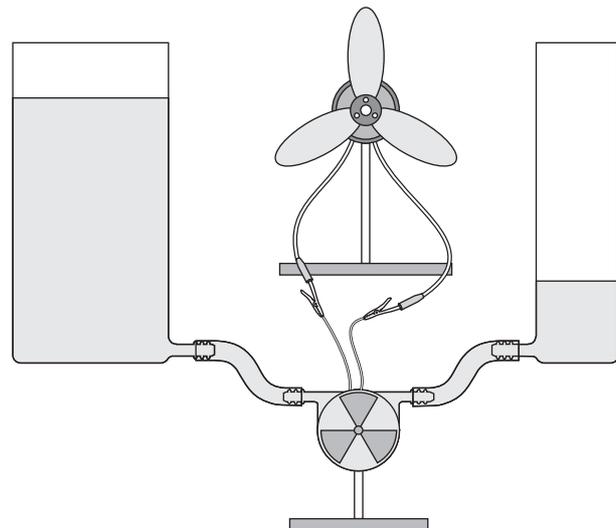
Aufgabe 1

Fülle die Behälter bei geschlossenem Hahn unterschiedlich hoch mit Wasser und baue den abgebildeten Versuch auf. Öffne die Hähne und beobachte genau.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den von dir beobachteten Versuchsablauf. Beschreibe auch, was man an der Drehung des Lüfters erkennen kann.

Vergleiche auch mit Station 5.



6.1.3C Lernstationen Strom-Antrieb

Station 1: Ein Elektrizitätsantrieb

Material: 2 Metallkugeln auf isoliertem Fuß, 1 Glimmlampe mit Kabeln, 1 Influenzmaschine

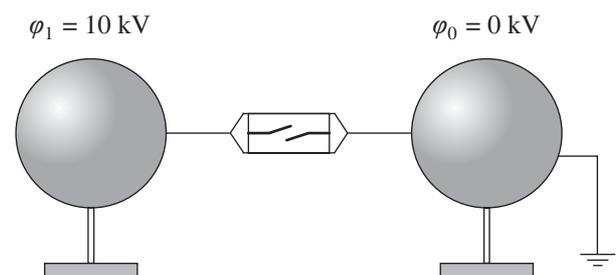
Aufgabe 1

Lade die Kugeln mit einer Elektrisiermaschine elektrisch auf. Schließe die Verbindung zwischen den geladenen Kugeln mithilfe der Glimmlampe und beobachte genau.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den von dir beobachteten Versuchsablauf. Beschreibe auch, was man am Leuchten der Glimmlampe erkennen kann.

Vergleiche auch mit Station 6.



Materialien

6.1.3D Lernstationen Strom-Antrieb

Station 4: Eine Luftpumpe

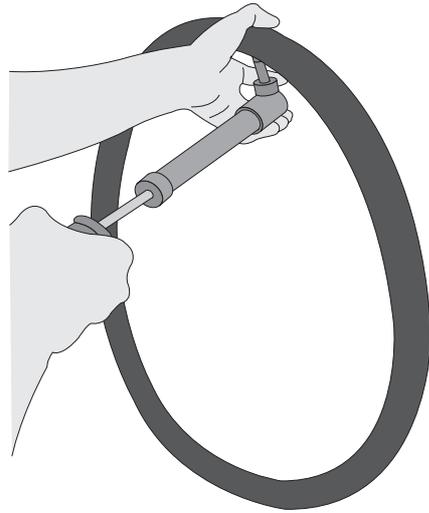
Material: 1 Fahrradpumpe
1 Fahrradschlauch

Aufgabe 1

Pumpe den Schlauch auf. Beobachte dich und den Schlauch beim Pumpen genau.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den von dir beobachteten Versuchsablauf. Beschreibe, was sich während des Pumpens ändert und wie du dir das erklären kannst. Vergleiche auch mit Station 1.



6.1.3E Lernstationen Strom-Antrieb

Station 5: Eine Wasserpumpe

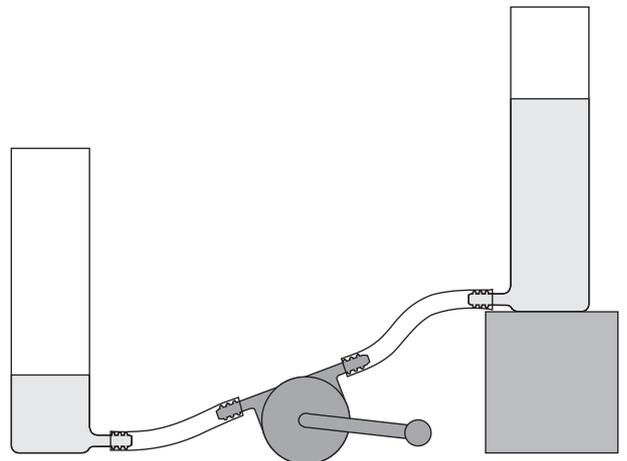
Material: 1 Wasserbehälter mit Schlauchanschluss
1 Hand-Wasserpumpe“ mit Schlauch

Aufgabe 1

Pumpe Wasser von einem zum anderen Behälter. Beobachte dich und den Wasserstand beim Pumpen genau.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den von dir beobachteten Versuchsablauf. Beschreibe, was sich während des Pumpens ändert und wie du dir das erklären kannst. Vergleiche auch mit Station 2.



6.1.3F Lernstationen Strom-Antrieb

Station 6: Eine Elektrizitätspumpe

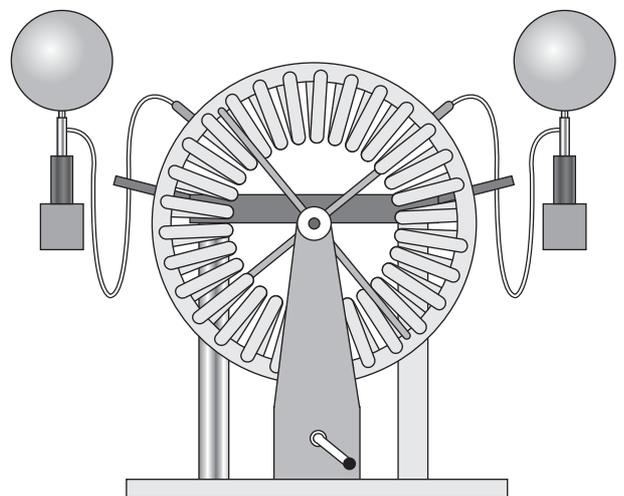
Material: 2 Metallkugeln auf isoliertem Fuß
1 Glimmlampe mit Kabeln
1 Influenzmaschine

Aufgabe 1

Pumpe Elektrizität von der einen zur anderen Kugel. Beobachte was sich dabei verändert.

Aufgabe 2

Schreibe alle Beobachtungen auf. Erkläre den Versuchsablauf. Beschreibe, was sich während des Kurbelns ändert und wie du dir das erklären kannst. Vergleiche auch mit Station 3.



Materialien

6.1.4C Lernstationen Entropie

Station 3: Thermisches Energiewerk

Material: 1 Thermoelement, 1 Elektromotor mit Lüfter,
1 Teelicht,
Metallunterlage zum Schutz des Thermoelements,
Streichhölzer, Eiswürfel

Aufgabe 1

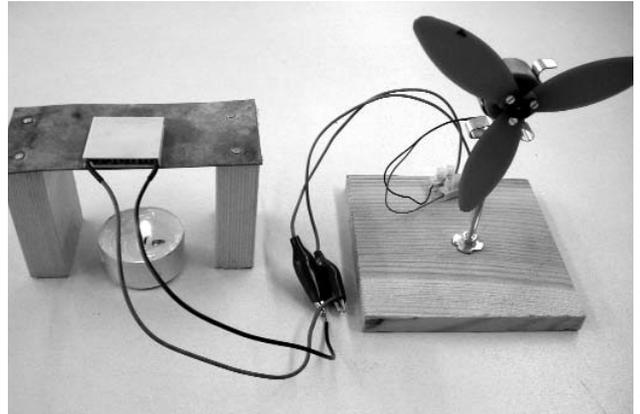
Verbinde das Thermoelement mit dem Lüfter und lege es auf die Metallunterlage. Stelle das brennende Teelicht darunter. Was beobachtest du nach kurzer bzw. nach längerer Zeit? Lege nun zusätzlich einen Eiswürfel auf das Thermoelement.

Aufgabe 2

Halte in einem neuen Versuch einen Eiswürfel an eine Seite eines Thermoelements, das mit dem Lüfter verbunden ist. Was erwartest du, wenn du den Eiswürfel an die andere Seite hältst? Was passiert tatsächlich? Was musst du tun, damit sich der Lüfter dann doch noch in die andere Richtung dreht?

Aufgabe 3

Schreibe alle Beobachtungen auf! Wann kommt viel, wann wenig Energie zum Lüfter? Wie erklärst du dir die Beobachtungen? Denke an deine Erfahrungen mit Wasserströmen! Schreibe deine Erklärungen ins Protokoll!



6.1.4D Lernstationen Entropie

Station 4: Unter Spannung ... ?

Material: 1 Thermoelement, 1 Multimeter,
kurzer Holzstab.

Beachte: Das Thermoelement darf vor dem Versuch nur kurz berührt werden (Überlege warum?). Du kannst es auch vorsichtig an den Anschlusskabeln halten!

Aufgabe 1

- Verbinde Thermoelement und Multimeter. Lege das Thermoelement dann auf die flache Hand und drücke es mit dem Holzstab an, sodass guter Hautkontakt entsteht. Miss die elektrische Spannung (Messbereich 100 mV)!
- Lege gleich anschließend zusätzlich die andere Hand so auf das Thermoelement, dass sich dieses jetzt zwischen beiden Händen befindet. Wie ändert sich die elektrische Spannung?

Aufgabe 2

Wenn es draußen deutlich kälter ist als im Physikraum (z. B. im Winter), kannst du Versuch 1 zusätzlich im Schulhof durchführen. Wie ändert sich das Versuchsergebnis?

Aufgabe 3

Schreibe alle Beobachtungen auf! Warum soll in Versuch 1a) zum Andrücken ein Holzstab und nicht dein Finger verwendet werden? Welchen Bedingungen müssen vorliegen, damit man eine Spannung messen kann? Welche physikalische Größe bestimmt die gemessene Spannung? Versuche bei den Erklärungen an deine Erfahrungen mit Wasserströmen anzuknüpfen. Schreibe deine Erklärungen ins Protokoll!

