

Systemisches Denken im Physikunterricht

Autor: Prof. Dieter Plappert, Freiburg



Bildquelle: Fotolia 32002384

Die heutigen zentralen Fragen (Klima, Welternährung, Coronapandemie, Weltwirtschaft, Flüchtlingsursachen,...) sind komplex. Punktuell, lokales, fraktales Denken verschließt den Blick auf das Ganze. Systemisches Denken, das Denken in Systemen, ist gefragt. Dies kann im Physikunterricht geübt werden. In diesem Artikel soll das an den Beispielen elektrische Stromkreise, elektrische Energieübertragung und Fließgleichgewicht gezeigt werden.

Einführung

Um den Ausstieg aus der fossilen Energieversorgung voranzubringen, wurde vor über 10 Jahren vom Europaparlament beschlossen, aus Pflanzen gewonnenen Biokraftstoff dem Benzin hinzuzufügen. Erst einige Zeit später wurde bewusst, dass durch den Anbau der dafür benötigten Pflanzen Anbaufläche zur Ernährung der Weltbevölkerung verloren geht. Der Konflikt „Teller statt Tank“ führte zu einem Bewusstseinswandel - das Gesamtsystem, das in den Blick genommen werden musste, war wesentlich komplexer geworden. Systemisches Denken ist eine der Voraussetzungen, um solche Fragestellungen begreifen zu können.



Abb. 1: Teller statt Tank

Elektrische Stromkreise müssen als System betrachtet werden

Einstieg:

- Wie hell leuchten welche Lampen (Abb. 2), wenn der Schalter noch offen ist?
- Wie hell leuchten die Lampen, wenn der Schalter geschlossen wird?
- Stelle eine Vermutung (Hypothese) auf und versuche sie zu begründen!
- Prüfe die Aufgabenstellungen experimentell mit entsprechendem Experimentiermaterial.
- Welche Fragen ergeben sich für dich?

Es zeigt sich, dass viele der Lernenden eine Art „Erhaltungskonzept für die Helligkeit der Lampen“ haben. Sie sagen voraus, dass nach Schließen des Schalters die beiden zuvor gleich hell leuchtenden Lampen dunkler werden, damit die dritte Lampe auch noch leuchten kann. Andere Lernende vermuten, dass unabhängig von der Schalterstellung alle Lampen immer gleich hell leuchten. Einige vermuten, dass die Lampe, die der Batterie am nächsten ist, am hellsten leuchtet. Das Experiment zeigt, dass durch das Schließen des Schalters die linke Lampe heller,

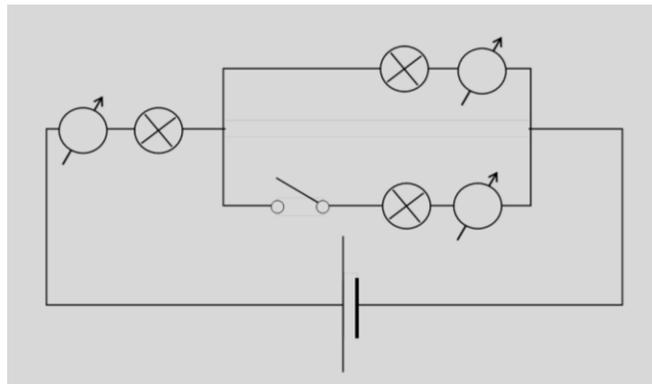


Abb. 2: Ein komplexes Problem als Einstieg

die rechte obere Lampe dunkler wird und dass beide rechten Lampen gleich hell leuchten. Dieses Ergebnis stellt die meisten Lernenden vor große Rätsel und motiviert sie zum weiteren Erforschen der elektrischen Stromkreise. „Wie kann das sein, dass die linke Lampe beim Schließen des Schalters heller wird und auch noch am hellsten leuchtet?“ Hinweis für ein späteres Experiment zur Vertiefung: wird statt eines *spannungsstabilisierten* Netzgeräts ein *stromstabilisiertes* Netzgerät verwendet, verändert sich die Helligkeit der linken Lampe beim Schließen des Schalters nicht.

Das Wasserstromkreismodell¹ - die Bildung eines tragfähigen inneren Bilds wird ermöglicht

Durch das zuvor dargestellte Experiment kann die Frage entstehen: „Was strömt eigentlich, wenn ein elektrischer Strom fließt?“ Diese Frage hatte in der Geschichte der Physik verschiedene Antworten. Die Physiker haben sich unterschiedliche mentale Bilder ausgedacht, um die Situation zu verstehen. Das Bild, das historisch zur heutigen Vorstellung „elektrischer Strom“ geführt hat, ist ein Wassermodell. So wie Wasser in Schläuchen strömt, so strömt Elektrizität in Kabeln. Elektrizität kann man nicht sehen – strömendes Wasser in den zuvor gefüllten transparenten Schläuchen auch nicht. Die drehenden Rädchen weisen auf strömendes Wasser hin. Je schneller sich die

¹ In der Betriebsanleitung zum Wasserstromkreis sind vielfältige Anwendungsbeispiele zur Einführung der Begriffe elektrische Stromstärke, elektrische Spannung, Parallel- und Reihenschaltung, elektrischer Widerstand zu finden <https://www.conatex.com/catalog/sku-1080751>

Rädchen drehen, desto größer ist die „Wasserstromstärke“².... Mit dem Wasserstromkreismodell³ kann dann wie in Abbildung 3 dargestellt die Schaltung aus Abbildung 2 veranschaulicht werden. Hierbei entspricht einem „verschlossenen“ Wasserhahn ein „geöffneter“ Schalter. Die Wasserrädchen drehen sich der Helligkeit der Lampen entsprechend. Es wird deutlich, dass sich das Wasser in der Parallelschaltung verzweigt und sich deshalb die Rädchen in den Zweigen langsamer drehen. Entsprechend leuchten die rechten Lampen in Abbildung 2 in den Zweigen des elektrischen Stromkreises dunkler als die Lampe links. Der elektrische Strom teilt sich dem Wasserstrom entsprechend in die Zweige auf. Da der Gesamtwiderstand des Systems durch das Öffnen des parallelen Zweigs kleiner wird, führt die Druckdifferenz der Pumpe zu einer größeren Wasserstromstärke und das Rädchen ganz links dreht sich schneller. Analog nimmt der Gesamtwiderstand des elektrischen Stromkreises durch die Parallelschaltung der rechten Lampen ab und die elektrische Stromstärke durch die linke Lampe und ihre Helligkeit zu. Anmerkung: Wasserströme werden im Unterricht oft zur Veranschaulichung der entsprechenden elektrischen Größen herangezogen, ohne dass die Lernenden eigene Erfahrungen mit geschlossenen Wasserstromkreisen haben, bei denen die Inkompressibilität des Wassers die entscheidende Rolle spielt. Deshalb können reale Wasserstromkreismodelle im Physikunterricht zu einem tiefergehenden Verständnis führen. Der hierfür nötige erhöhte Zeitbedarf wird kompensiert durch die stabilen inneren Bilder, auf die in den folgenden Klassenstufen aufgebaut werden kann.

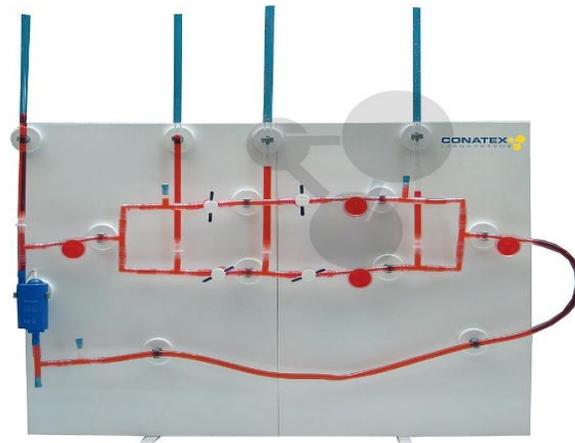


Abb. 3: Das Wasserstromkreismodell von Conatex

Stromkreise reagieren als Ganzes

Der Stromkreis reagiert immer als Ganzes, als System. So verhält sich das Einzelne immer dem Ganzen und das Ganze dem Einzelnen entsprechend. Der Wasserstromkreis kann das verdeutlichen mit der Frage: „*welches der Wasserrädchen dreht sich nach dem Einschalten der Pumpe zuerst*“. Viele Lernenden vermuten, dass das Rädchen, das der Pumpe am nächsten steht, sich zuerst zu drehen beginnt. Das Experiment zeigt: alle Rädchen beginnen gleichzeitig sich zu drehen. Da das Wasser inkompressibel ist beginnt das Wasser an jeder Stelle des Kreises gleichzeitig zu strömen. Alles hängt mit Allem zusammen. Wird an einer Stelle der Schlauch von außen zusammengedrückt, werden alle Rädchen gleichzeitig langsamer: das System reagiert als Ganzes auf eine lokale Störung. Ein solches Systemdenken kann nicht nur auf elektrische Stromkreise übertragen werden, sondern auch auf komplexere Stromkreise, wie etwa den Teller-Tank-Konflikt.

² Die Wasseranalogie wird ausführlich dargestellt unter www.plappert-freiburg.de/images/PDF/unterrichtsbeispiele/verstaendliche-elektrizitaetslehre.pdf

³ <https://www.conatex.com/catalog/sku-1080751>

Wo wird der elektrische Strom eigentlich verbraucht?

Dass die elektrische Stromstärke vor und nach einer Lampe denselben Wert hat, erstaunt die Lernenden wegen der zuvor dargestellten Analogie zu den Wasserströmen zunächst nicht. „Der elektrische Strom fließt immer im Kreis.“ Bei fortschreitendem Unterricht wird für viele der Lernenden jedoch die Frage immer drängender, was nun eigentlich im Stromkreis verbraucht wird. In der Alltagssprache sagt man ja „in einem Dynamo wird Strom erzeugt“, „in einer Glühlampe wird Strom verbraucht“, bzw. „in Licht umgewandelt“. Diese Frage ist der Ausgangspunkt zu Energiebetrachtungen mithilfe des „Energie-Träger-Stromkreis“⁴ (Abb. 4).

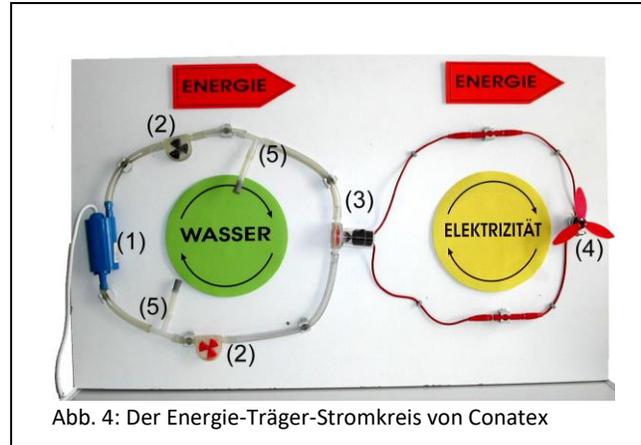


Abb. 4: Der Energie-Träger-Stromkreis von Conatex

Dort wird eine tiefgehende physikalische Strukturgleichheit⁵ versinnbildlicht: ein Wasserstromkreis (links) und ein elektrischer Stromkreis (rechts) sind durch einen Wassergenerator (3) miteinander gekoppelt. Der Energie-Träger-Stromkreis kann helfen, die Begriffe „Energie“⁶ und „Energieträger“ klarer zu differenzieren und zusammen zu sehen. Es wird nachvollziehbar, dass Energie von der Pumpe zum Wassergenerator und von dort zu einem motorangetriebenen Propeller fließt (Energiepfeile) und dass das Wasser und die Elektrizität (bzw. elektrische Ladung) *andere* Wege nehmen: das Wasser und die Elektrizität fließen im Kreis. Wasser und Elektrizität bzw. Wasserstrom und elektrischer Strom haben die Rolle des Energieträgers bzw. sind für den Energietransport zuständig. Die Energie wird im Wassergenerator, nicht „verbraucht“ - sie wird auf einen neuen Energieträger umgeladen: im Wassergenerator vom Wasser auf Elektrizität und im motorbetriebenen Propeller von Elektrizität auf bewegte Luft.

Die Differenzierung von „elektrischem Strom“ vom „Strom der elektrischen Energie“ kann durch folgende charakteristische Armbewegung im Sinne des Embodiments⁷ unterstützt werden:

- kreist der Arm, so symbolisiert er den Wasserstrom, den elektrischen Strom, ... den Strom des Energieträgers.
- bewegt sich der Arm linear von links nach rechts, so symbolisiert er den Strom der Energie. Z. B. in Abb. 6 von der Sonne, zur Solarzelle, zum Propeller, hinaus in die Luft⁸.

⁴ <https://www.conatex.com/catalog/sku-1080700>

⁵ <https://www.plappert-freiburg.de/images/PDF/unterrichtsbeispiele/zur-strukturgleichheit-verschiedener-gebiete.pdf>

⁶ Unterrichtsbeispiele zur Einführung des Energiebegriffs: <https://www.plappert-freiburg.de/images/PDF/unterrichtsbeispiele/der-energiebegriff.pdf>

⁷ Embodiment (deutsch: Verkörperung, Inkarnation oder Verleiblichung) ist eine These aus der neueren Kognitionswissenschaft, nach der Bewusstsein einen Körper benötigt, also eine physikalische Interaktion voraussetzt. Diese Auffassung ist der klassischen Interpretation des Bewusstseins diametral entgegengesetzt und wird als grundlegende Wende in der Kognitionswissenschaft angesehen.

⁸ Bausatz <https://www.opitec.de/werkpackungen/solar-alternative-energie/holz--/energiewerke.html>

Auf den Antrieb kommt es an!!!

Woher die Energie stammt, mit der der Akku eines Elektroautos aufgeladen wird, ist für die Umweltbilanz des Autos entscheidend. Stammt sie z. B. aus fossiler Energie, wie etwa einem Braun- bzw. Steinkohlekraftwerke oder von regenerativer Energie. „Es kommt darauf an, wer das Ganze antreibt!“ Mit Hilfe des Energie-Träger-Stromkreises kann das veranschaulicht werden: die Pumpe wird mit einem Handgenerator⁹ (Abb. 7) angetrieben. Eine Schülerin bzw. ein Schüler treibt den Wasserstrom und damit den elektrischen Strom und damit den Propeller an. Die Antriebsenergie wird von den Muskeln bereitgestellt und stammt letztendlich von den Nahrungsmitteln und damit von der Sonne.



Abb. 6: Die Energie strömt mit dem Licht zur Solarzelle, mit dem elektrischen Strom zum Propeller und von dort in die bewegte Luft

Der natürliche Treibhauseffekt - ein Fließgleichgewicht

Mithilfe einer Wasseranalogie kann auch die Problematik des anthropogenen Treibhauseffekts verdeutlicht werden. Die in Abbildung 8 dargestellten Energieströme sollen zunächst das Strömungsgleichgewicht erläutern, das sich bei der Erde ohne Atmosphäre einstellen würde. Mit dem Sonnenlicht trifft ein Energiestrom die Erde. Die Oberfläche der Erde erwärmt sich so lange, bis die gesamte Energie mit Wärmestrahlung die Erde wieder verlässt. Dann hat sich ein Energie-Fließgleichgewicht eingestellt. Die Gleichgewichtstemperatur beträgt dabei rechnerisch -18°C . Dieses Fließgleichgewicht kann durch den folgenden Versuchsaufbau veranschaulicht werden: nach Öffnen des Wasserhahns steigt der Wasserspiegel im Gefäß¹⁰ in Abb. 9 so lange, bis genau so viel Wasser unten herausläuft wie zur selben Zeit oben hineinströmt. Durch das Steigen des Wasserspiegels in Abb. 9 steigt der Druck am Abfluss. Der Wasserstrom wird dann stärker angetrieben und die Stärke des Wasserstroms durch den Abfluss nimmt zu, so lange der Wasserspiegel ansteigt. Fließt unten aus dem Gefäß dann genausviel Wasser heraus, wie gleichzeitig oben hineinströmt, dann hat sich ein Fließgleichgewicht eingestellt. Ersetzen wir den Wasserstrom durch Energiestrom, die Temperatur durch Höhe des Wasserspiegels, so wird die Analogie von Abbildung 8 und 9 deutlich.



Abb. 7: Auf den Antrieb kommt es an!

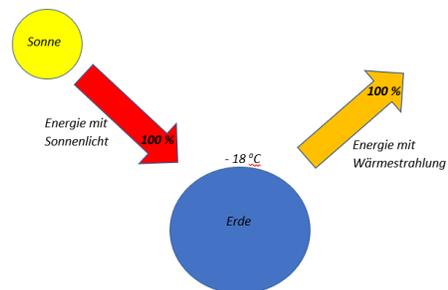


Abb. 8: Fließgleichgewicht ohne Atmosphäre

⁹ <https://www.conatex.com/catalog/sku-1132035>

¹⁰ <https://www.conatex.com/catalog/sku-1080711>

Die bisherigen Betrachtungen berücksichtigen nicht die Atmosphäre der Erde. Ohne diese wäre bei von -18°C , der Gleichgewichtstemperatur, kein menschliches Leben auf der Erde möglich.

Durch die Berücksichtigung der Atmosphäre (Abb. 10) ergeben sich die folgenden Modifikationen zu den bisherigen Betrachtungen:

Der Wasserhahn in Abb. 9 wird ein wenig geschlossen. Der Strömungswiderstand am Ausfluss nimmt zu. Damit sich wieder ein Fließgleichgewicht einstellen kann, muss der Wasserstrom am Ausgang stärker angetrieben werden, die Druckdifferenz muss dort größer werden. Der Wasserspiegel steigt so lange, bis sich ein neues Fließgleichgewicht bei einem höheren Wasserspiegel eingestellt hat. Diese Überlegungen wollen wir nun auf die Erde mit Atmosphäre übertragen (Abb. 10): Die Treibhausgase (CO_2 , Methan, Wasserdampf, ...) lassen nur einen Teil der Strahlung, die von der Erde abgestrahlt wird, „direkt“ in Richtung Kosmos hindurch. Ein Teil wird von der Atmosphäre absorbiert und zur Erde zurückgestrahlt. Dieser zusätzliche Strom von Energie trifft die Erde. Dadurch erhöht sich die Temperatur der Erde so lange, bis letztendlich die gesamte eingestrahelte Energie wieder die Erde verlässt. Es hat sich dann ein neues Fließgleichgewicht bei einer höheren Erdtemperatur eingestellt. Die Atmosphäre der Erde bewirkt den natürlichen Treibhauseffekt. Durch die Atmosphäre ist der „Strömungswiderstand“ für den Energiestrom, der von der Erde in den Kosmos fließt, größer geworden. Die Gleichgewichtstemperatur der Erdoberfläche, die sich beim Strömungsgleichgewicht einstellt, muss wie der Wasserspiegel in Abbildung 9, höher sein. Sie beträgt etwa 14°C . Hinweis: das Dargestellte kann auch mit dem in Abb. 11 dargestellten Versuchsaufbau¹¹ gezeigt werden.

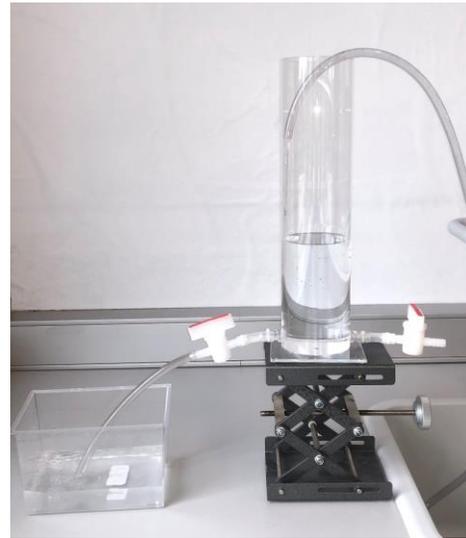


Abb. 9: Der Wasserspiegel im Behälter steigt so lange, bis sich ein Fließgleichgewicht einstellt.

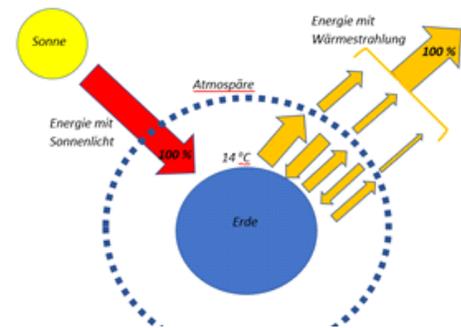


Abb. 10: Fließgleichgewicht mit Atmosphäre

¹¹ <https://www.conatex.com/catalog/sku-2006501>

Der anthropogene Treibhauseffekt - ein natürliches Fließgleichgewicht wird gestört

Mit der Erfindung der Dampfmaschine („*industrielle Revolution*“) hat die immer stärkere Nutzung der Energie von fossilen **Energieträgern** wie Kohle, Erdgas, Erdöl begonnen. Dabei wurde in zunehmendem Maße CO₂ freigesetzt. Der CO₂-Gehalt der Erde wuchs mit immer größerer Geschwindigkeit (Abb. 12, untere Grafik mit linke Skala, blaue Kurve). Obwohl die Treibhausgase wie z.B. CO₂¹² nur in kleinsten Mengen in der Atmosphäre vorhanden sind (beim *natürlichen* Treibhauseffekt weniger als 0.3 Promille) haben sie für die „Temperaturregelung“ der Erde eine entscheidende Bedeutung. In Abbildung 12 zeigt die obere Grafik mit der rechte Skala und schwarzer Kurve, wie die Temperatur der Erde synchron mit dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre steigt. Mit der Brille unserer Strömungsanalogien betrachtet heißt das, dass der „Strömungswiderstand“ des Energiestroms von der Erde in den Kosmos immer größer wird, oder im Bild der Wasseranalogie, der Hahn, durch den das Wasser abströmen kann, immer mehr geschlossen wird (Abb. 11). Welche Folgen das für das Leben auf der Erde hat, wird immer mehr spürbar. Dass es darum geht, die zusätzliche CO₂-Freisetzung, die Vergrößerung des Strömungswiderstands der Wärmestrahlung durch die Atmosphäre schnell zu einem Ende zu bringen, ist durch die hier angestellten Betrachtungen des physikalischen Hintergrunds einleuchtend.



Abb. 11: Versuchsaufbau mit Trichter und Absperrhahn

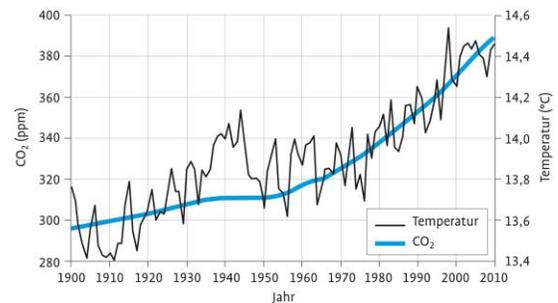


Abb. 12: Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre und die Temperatur der Erde steigen synchron. Quelle: Prof. Dr. Mojib Latif, GEOMAR.

Zum Schluss

Die hier angestellten Betrachtungen sollen bei den Lernenden das dynamische Sehen und Denken stärken: Offene Systeme, der Blick für größere Kreisläufe, treten in den Blick. Das scheinbar Feste, Statische wird zu einem Bewegungs- bzw. Strömungsgeschehen: eine biologische Zelle, eine Kerzenflamme, eine Pflanze, der Menschen, die Atmosphäre der Erde. In Abbildung 13 sei das exemplarisch für die Energieversorgung des Menschen dargestellt. Der Mensch ist eingebunden in die verschiedensten Kreisläufe. Die Energie der Sonne wird von Möhren getragen. Der Mensch kann sie nutzen, indem er Sauerstoff aufnimmt. Es entstehen „Abbauprodukte“ (CO₂, Wasser, Fäkalien), die wieder in den Kreislauf der Natur eingehen und zum Wachstum der Möhren wiederverwendet werden.

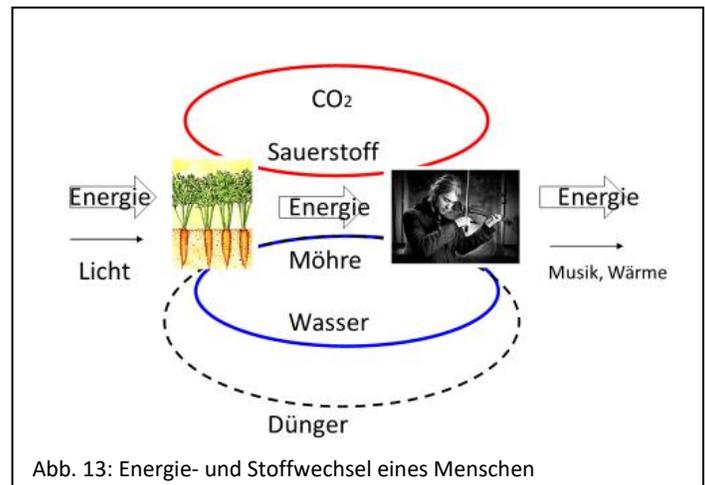


Abb. 13: Energie- und Stoffwechsel eines Menschen

¹² Wir betrachten hier um einen ersten Überblick zu bekommen nur das CO₂. Alle anderen Treibhausgase müssen im Detail natürlich auch betrachtet werden.

Ein solches dynamisches Denken in großen Zusammenhängen, bei komplexen Systemen, führt zu einer anderen Weltsicht. Es wird deutlich, dass alles mit allem zusammenhängt. Um die drängenden Fragen der Gegenwart überhaupt fundiert betrachten zu können, muss ein solches Denken ein zentrales Bildungsziel aller Bildungseinrichtungen sein. Hierfür soll, der hier beschriebene Physikunterricht einen Beitrag leisten.

Anhang: Starke Bilder führen zu klaren Verhältnissen

Der Prozess der physikalischen Begriffsbildung muss berücksichtigen, dass, zu Beginn der Sekundarstufe nur sehr wenige der Lernenden in der Lage sind, formale Begriffe verstehen und bilden zu können¹³. Deshalb ist es bei der Einführung der physikalischen Begriffe wichtig, behutsam voranzuschreiten. Zunächst steht die qualitative Begriffsbildung im Vordergrund. Im Bereich der Elektrizitätslehre ist es zunächst ein zentrales Anliegen, die Alltagssprachliche Beschreibung „in einer Lampe wird Strom verbraucht“ zum physikalischen Verständnis „Energie wird mit dem elektrischen Strom zur Lampe hin transportiert, der elektrische Strom fließt dann weiter im Kreis, und die Energie verlässt den Stromkreis durch die Lampe mit Licht und Wärme¹⁴“ zu entwickeln. Lernende scheinen im räumlich-geometrischen Bereich, z. B. bei geometrischen Linienkonstruktionen, früher über formal-operationale Möglichkeiten zu verfügen. Das könnte mit der Art der Reifung der Gehirnstrukturen zusammenhängen. Prägnant formuliert: „Für die formal-operationale Funktion des Rechnens werden die Gehirnareale des räumlichen Vorstellungsvermögens ausgeliehen.“¹⁵ Es scheint, dass „räumliche Sinnbilder“ wie Brückenpfeiler angelegt werden können, so dass auf sie aufgebaut werden kann, sobald der Lernende die formal-operationale Stufe wirklich erreicht hat. Die „räumlich-geometrischen Sinnbilder“ werden somit „Sinnbilder des Formalen“. Ich selbst konnte das mit der in Abbildung 14 dargestellten Wasseranalogie zur Funktionsweise eines Transistors erleben. Als Jugendlicher hatte ich kein Interesse mir beim Bau elektronischer Schaltungen die Funktionsweise des Transistors klar zu machen. In der Bauanleitung übersprang ich einfach die Erklärung. Mein Ziel war „nur“, dass die Schaltung funktioniert. Als Student tauchte die nicht verarbeitete Abbildung 14 in meinem Bewusstsein wieder auf und half mir dann die angebotenen physikalischen Erklärungen tiefergehend zu verstehen. Die Zeichnung wirkte rückblickend also wie ein „Sinnbild des Formalen“.

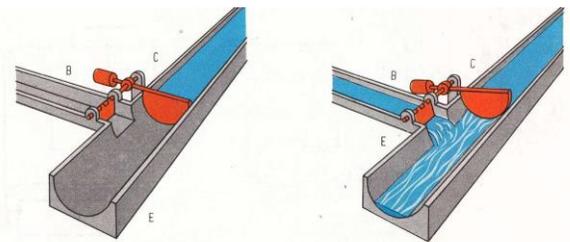


Abb. 14: Funktionsweise eines Transistors mit Wasserströmen veranschaulicht.

Die abschließenden Zitate aus persönlichen Resümees einiger Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 7 und sollen zeigen, welche Wirkung die zuvor beschriebenen Ansätze im konkreten Unterrichtsalltag haben können:

„Am wichtigsten für mich war, dass wir den elektrischen Stromkreislauf mit dem Wasser-Strom-Kreislauf anschaulich erklärt bekommen haben. Man konnte so viel besser verstehen, wie der

¹³ <https://www.plappert-freiburg.de/index.php/files/11/Neue-Kategorie/3>

¹⁴ Hier wird zunächst die umgangssprachliche Bezeichnung „Wärme“ statt der physikalischen Bezeichnung „Entropie“ verwendet. Auf Niveau B1+ bzw. 2 oder in einem naturwissenschaftlichen Studium kann die Begriffsbildung dann bei Bedarf problemlos in diese Richtung hin verfeinert werden.

¹⁵ Zu Vertiefung: Plappert, Dieter: Naturkundliche und naturwissenschaftliche Bildung, Heft NW 4, Landesinstitut für Schulentwicklung (LS), Stuttgart 2014, S. 19ff, www.plappert-freiburg.de/images/PDF/unterrichtsbeispiele/leitlinien-naturkundliche-und-naturw-bildung.pdf

Strom funktioniert. Doch da man das mit dem Widerstand noch nicht so gut verstehen konnte, war es sehr wichtig, dass wir einen „Menschen-Stromkreis“¹⁶ erstellt haben.“ (7)

„Und als wir den „menschlichen Stromkreislauf“ gemacht haben, habe ich sofort den Stromkreis verstanden (Antrieb und Widerstand). (7)

„Beim Stromkreismodell hat man durch das, dass man Teil des Stromkreises war, diesen nochmals besser nachvollziehen und verstehen können und hat ihn so „mitemlebt“. (7)

„Eines der wichtigsten Themen in diesem Schuljahr war für mich die Elektrizitätslehre. Wir haben die verschiedenen Begriffe erklärt und herausgefunden, wie man sie messen kann. Besonders das Rechnen hat mir total viel Spaß gemacht. Das Rechnen war nicht allzu schwer, hat einen aber dennoch gefordert. Außerdem war das Rechnen auch mal eine erfrischende Abwechslung, da wir dies nicht so oft machen!“¹⁷ (9)

„Das erste, was ich sehr wichtig fand, war die Zeit, in der wir mit den beiden Formeln $P = U \cdot I$ und $R = U/I$ gerechnet haben. Es hat mir bewiesen, dass vieles nicht so kompliziert ist, wie es erst mal wirkt.... Ich war erst mal komplett aus dem Thema. Es war etwas relativ Schwieriges zu verstehen für mich, doch später, mit ein bisschen mehr Übung, hatte ich plötzlich alles verstanden, und die Rechnungen mit den Formeln fielen mir am einfachsten, wenn man erstmal alle Maßeinheiten und Begriffe kannte.“ (9)

¹⁶ <https://www.plappert-freiburg.de/index.php/files/11/Neue-Kategorie/3>

¹⁷ Vielleicht hängt die Freude beim Rechnen auch damit zusammen, dass die Mathematisierung der Phänomene wohldosiert, an exemplarischen Stellen im Unterricht angewandt wurde.