

«Das Phänomen im Zentrum. Der Weg zum Modell und wieder zurück»

VOM MODELL ZUM PHÄNOMEN BEIM STROMKREIS?

11. Innovationstag SWiSE, 26. März 2022

Dr. Matthias Bigler, Dozent Natur und Technik (Physik), PH Bern, IS1

PHBern

Abstract

Bei vielen naturwissenschaftlichen Themen sind Phänomene der «Königsweg», um den Lernenden den Zugang zu ermöglichen und das Lernen zu initiieren. Phänomene (und der Lerngegenstand insgesamt) weisen in der Elektrizität jedoch einen hohen Abstraktionsgrad auf und kommen sehr «technisch» daher, was erschwerend ist. Der Schlüssel zum Verständnis bildet die Arbeit mit Modellen. Drängt sich hier also eher der Weg vom Modell zum Phänomen auf?

Es gibt verschiedene Modelle, um Grössen und Gesetzmässigkeiten in der Elektrizität zu veranschaulichen – jedes mit Stärken und Schwächen. In diesem Atelier werden verschiedene Modelle zur Elektrizität und Elektronik vorgestellt, verglichen, interaktiv umgesetzt und in Kleingruppen anhand konkreter Experimente zur Erklärung von Phänomenen eingesetzt.

Die Präsentation inklusive Abbildungen und Animationen sowie weitere Materialien erhalten Sie auf Anfrage direkt bei matthias.bigler@phbern.ch

Phänomene ermöglichen Zugänge und initiieren das Lernen

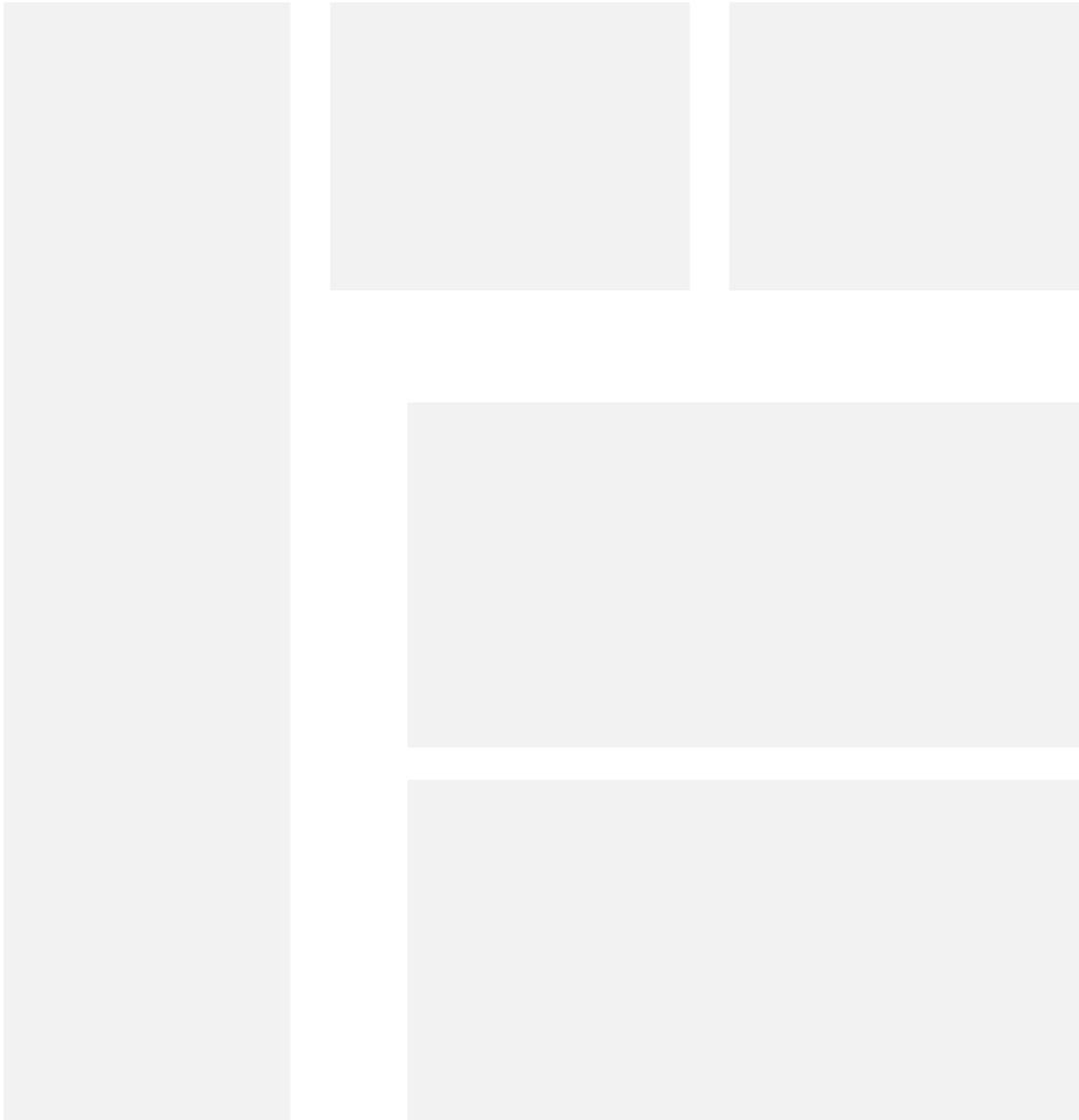
«Es muss ein (...) Phänomen da sein, das die Eigenschaft hat, dass man darüber stolpert (...). Man wundert sich, es ist rätselhaft, eine Sache, die in höchstem Mass erstaunlich ist. Und zwar nicht so, dass man sich fürchtet, sondern, dass sie bewundernswert ist. Das sie also zu schön ist, um wahr zu sein. (...)»

«Erst etwas Erstaunliches, (...) (doch nicht allzu sehr) Kompliziertes, Problematisches (...) dann: (...) [darin] ein Verständlicheres, Gewohntes erkennen lassen (...). (...) Erst das Natur-phänomen, dann das Labor-phänomen. (...) Erst <qualitativ>, dann quantitativ. (...) Erst das Phänomen, dann die Theorie und die Modellvorstellung.»

Martin Wagenschein (1896-1988)

Verstehen lehren. Päd. Bibliothek Beltz, 1989, S. 121f.

Phänomene in der Elektrizität



Phänomene denen Elektrizität zugrunde liegt, wie Blitze, Zitteraale und Zitterrochen, chemische Bindungen oder das Nervensystem ...

... sind kaum zugänglich, flüchtig, gefährlich, spezifisch, abstrakt und/oder komplex.

Wenn wir die Elektrizität verstehen wollen, müssten wir uns ins Innere der fast unvorstellbar kleinen Atome begeben und einen Blick auf ihre Bestandteile werfen. Da dies ausgeschlossen ist, bleibt uns nur der Weg über *Modelle*.

Ladung, Stromstärke, Spannung ...

Obwohl *Ladungen* die Grundlage aller Elektrizität, ja sogar ein Grundphänomen unserer Universums sind, ist der Begriff im Alltag kaum geläufig – im Gegensatz zu den Begriffen *Spannung*, *Stromstärke*, *Widerstand*, *Leistung* und *elektrische Energie*. Aber auch diese geläufigen Begriffe sind abstrakt.

Wie definieren Sie die *Stromstärke* in Worten (keine Formel)?

Wie definieren Sie die *Spannung* in Worten (keine Formel)?

Im Herbstsemester 2019 konnten 31 % der erstsemestrigen Studierenden zu Beginn der Veranstaltung Physik I – Elektrizität die Stromstärke und nur 7 % die Spannung einigermaßen korrekt definieren, im Herbstsemester 2021 waren es nur 15 %, respektive nur 2 %.

Wasserkreislaufmodell

Lehrplan 21 NMG.5.2 (Zyklus 1 und 2):

Die Schülerinnen und Schüler ...

1b ... können einfache Stromkreise aufbauen und einzelne Bestandteile benennen.

1c ... können elektrischen Strom als bewegte kleinste Teilchen beschreiben und die Analogie zu strömendem Wasser herstellen und erklären.

Lehrmittel NaTech 3/4 (Abbildung rechts):

Stromkreis – Wasserkreis

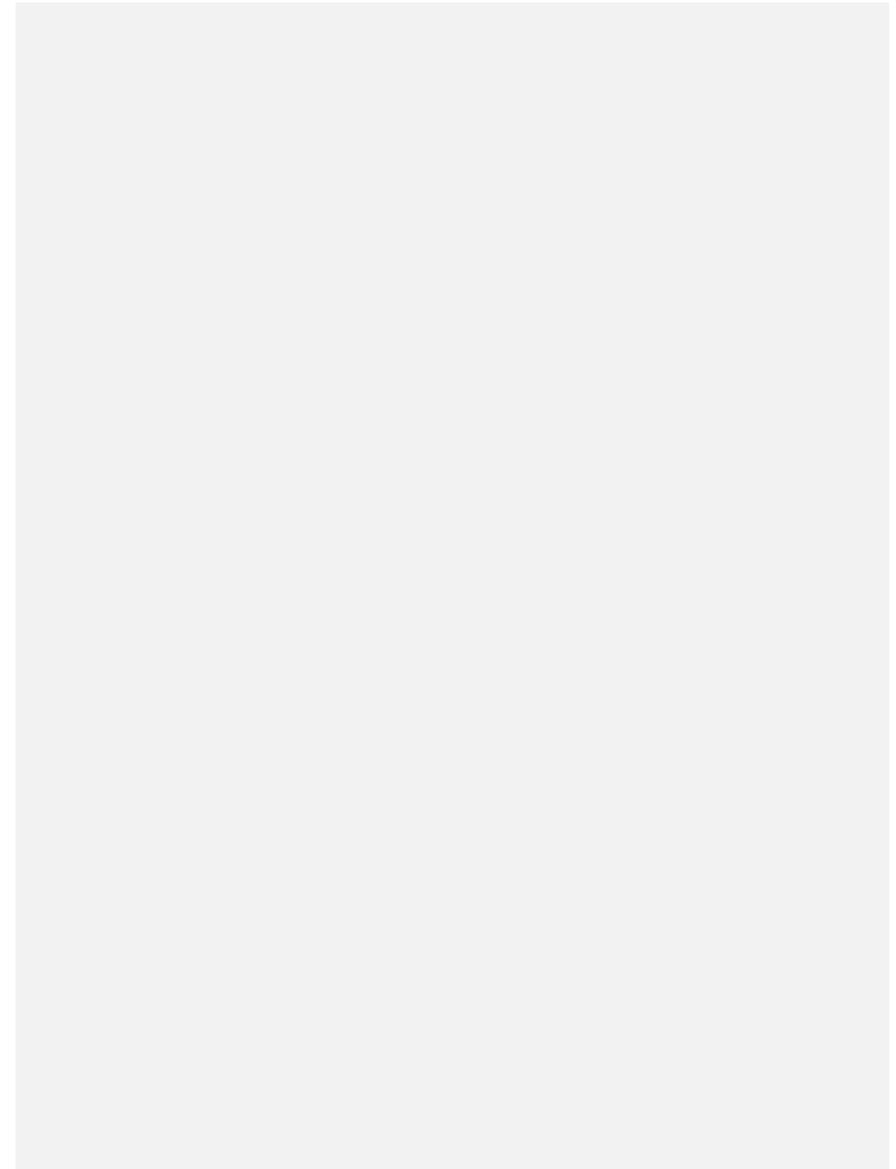
Elektronen – Wasser

Glühlampe – Wasserrad

Kabel – Rohre

Schalter – Wasserhahn

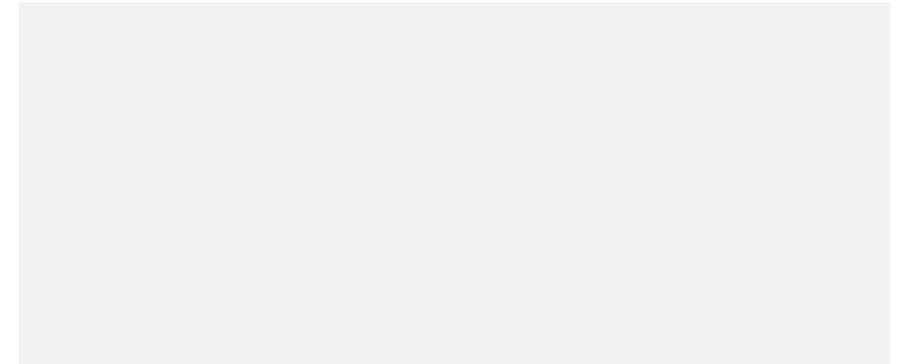
Batterie – Pumpe



Wasserkreislaufmodell und weitere vergleichbare Modelle

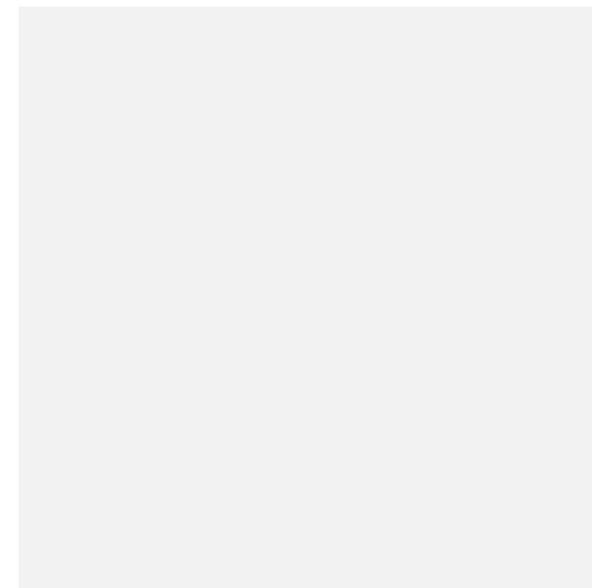
Wie das *Wasserkreislaufmodell*, zeigen auch andere Analogien wie das *Fahrradkettenmodell* oder der starre *Elektronenring* (Abbildungen rechts) den Systemcharakter von Stromkreisen auf, wonach ein geschlossener Stromkreis die Voraussetzung dafür ist, dass ein Strom fließen kann und eine Änderung an einer Stelle im Stromkreis sich unmittelbar auf den gesamten Stromkreis auswirkt. Weiter eignen sie sich gut gegen die Stromverbrauchsvorstellung.

Diese Modelle können aber den Strom- und den Spannungsbegriff, deren quantitativen Aspekte sowie die Verhältnisse in Serie- und Parallelschaltungen kaum erklären.



hohe Kettenspannung

niedrige Kettenspannung



Elektronen-
ringmodell

Forschungsergebnisse zum Wasserkreislaufmodell

«Studien zeigen, dass die Wasseranalogie im Vergleich zu anderen Modellen im Allgemeinen zu schlechteren Lernleistungen führt.»

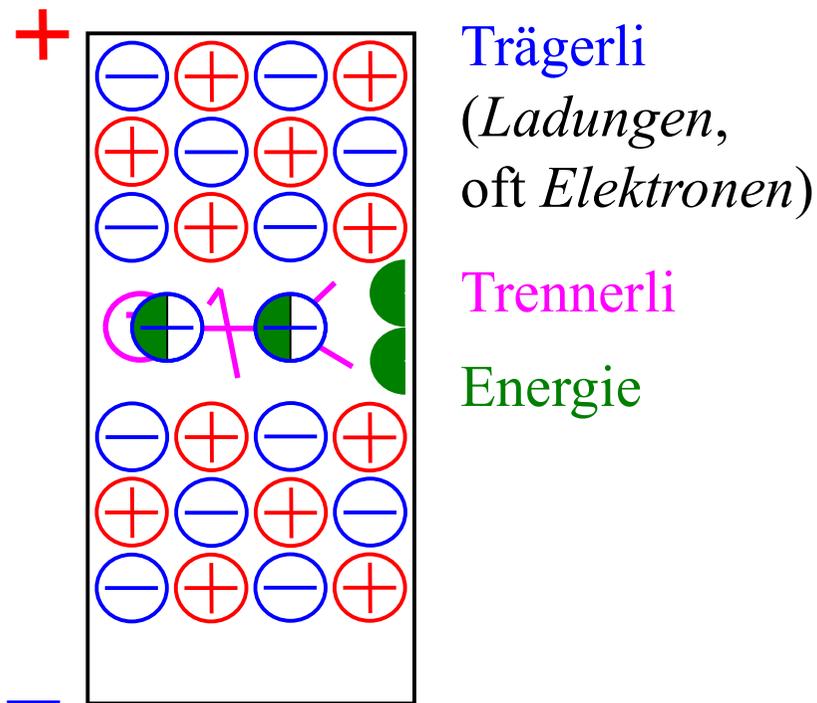
Thomas Wilhelm: Stolpersteine überwinden im Physikunterricht, S.101

«Das Lernen des Wassermodells ist schwieriger als das Lernen der Stromkreise selbst.»

Ernst Kircher, zitiert in Thomas Wilhelm: Stolpersteine überwinden im Physikunterricht, S.101

Rucksackmodell

Modell zur Erklärung der Situation im Stromkreis, hier mit einer *Batterie*. Das Modell wird *Rucksackmodell* oder *Trennerli-Trägerli-Verbraucherli-Modell* genannt.



Trägerli
(Ladungen,
oft *Elektronen*)

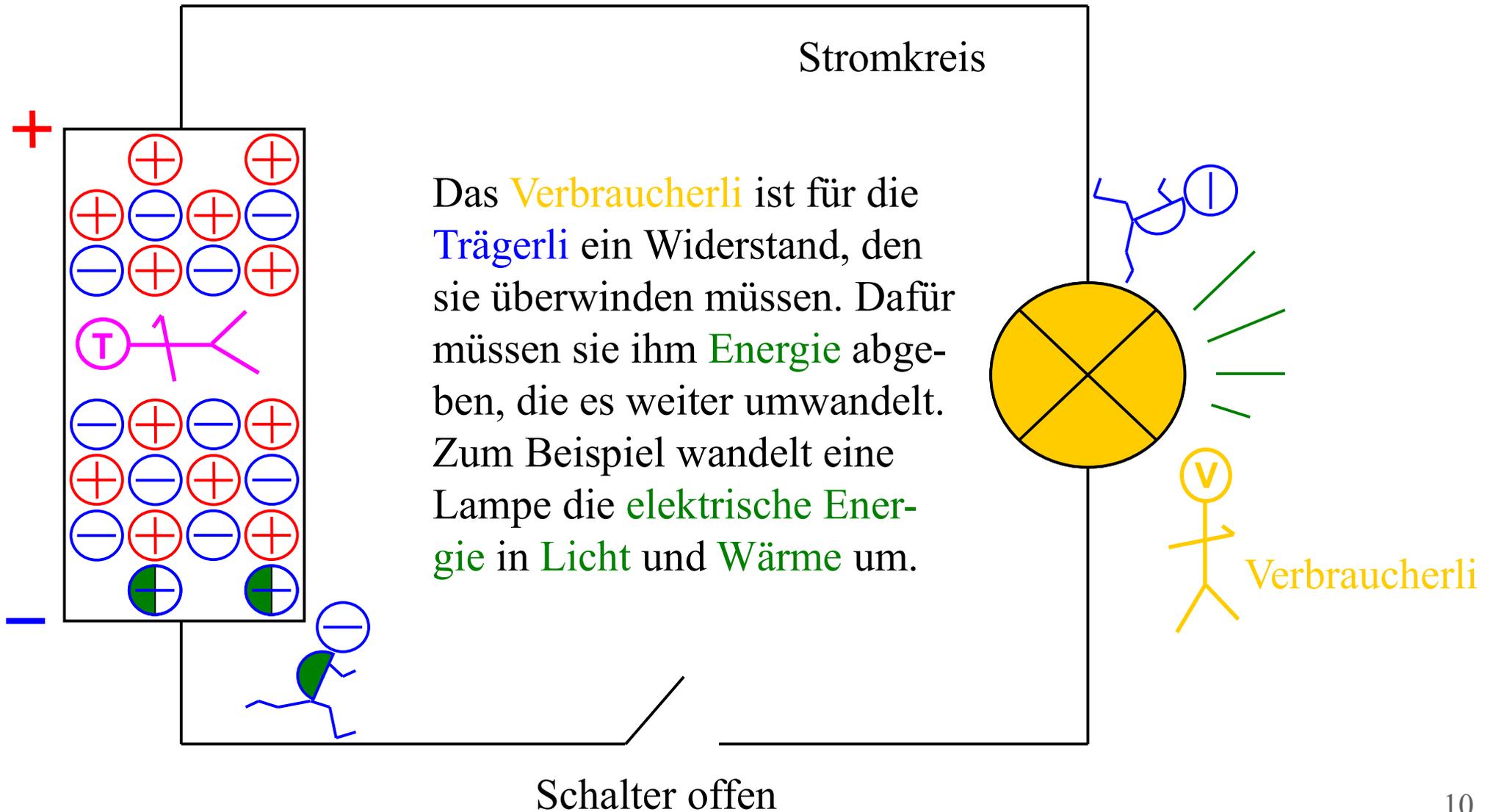
Trennerli
Energie

Das **Trennerli** in der Batterie bringt die **Trägerli** von der einen Seite der Batterie auf die andere Seite – es bewirkt eine *Ladungstrennung*. Dabei gibt es jedem **Trägerli** eine Portion **Energie** in den Rucksack.

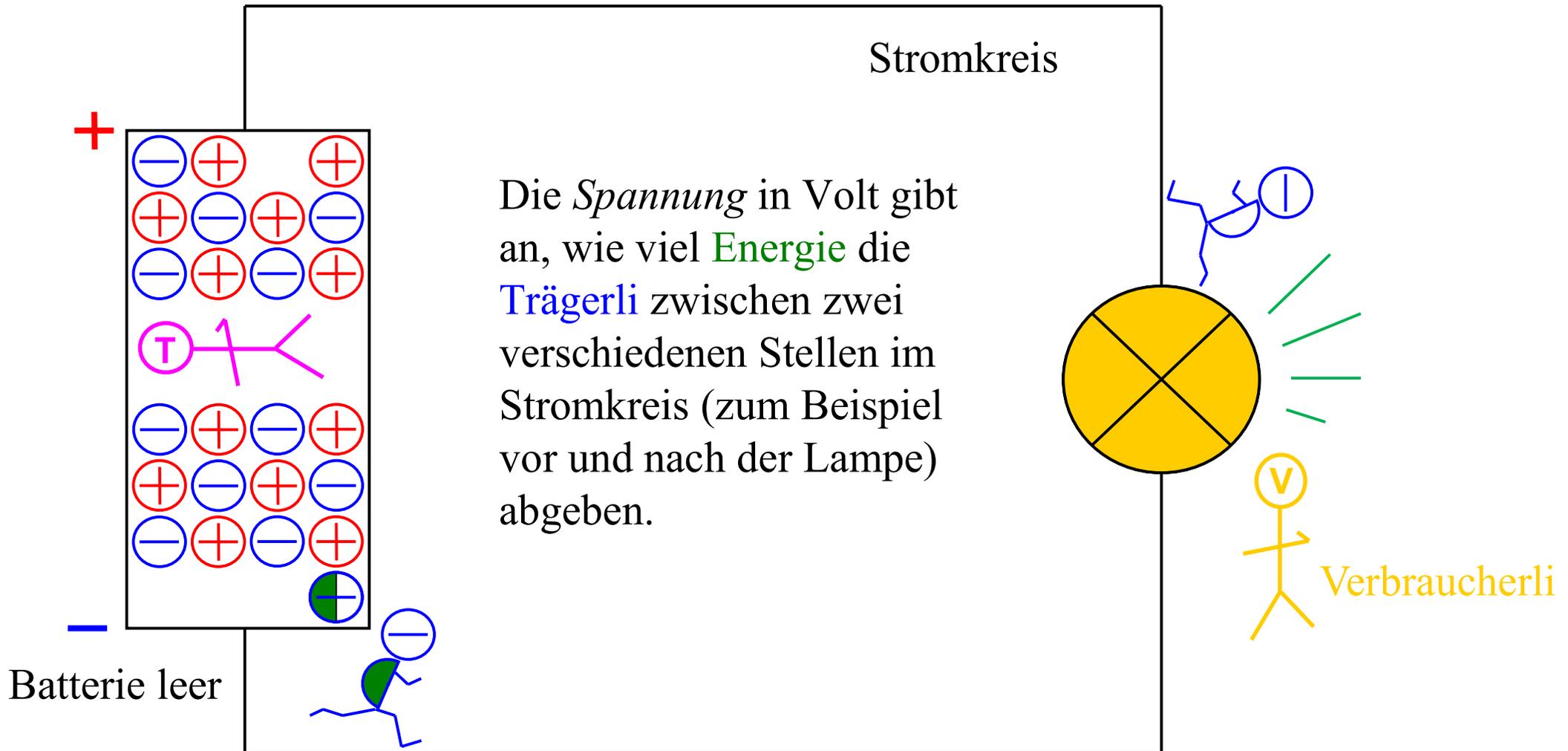
Die *Spannung* in Volt, an der Batterie angeschrieben, beschreibt, wie viel **Energie** jedes **Trägerli** in seinen Rucksack aufnimmt.

Auch in einem *Generator* eines Kraftwerks oder in einer *Solarzelle* wirkt ein **Trennerli**.

Rucksackmodell

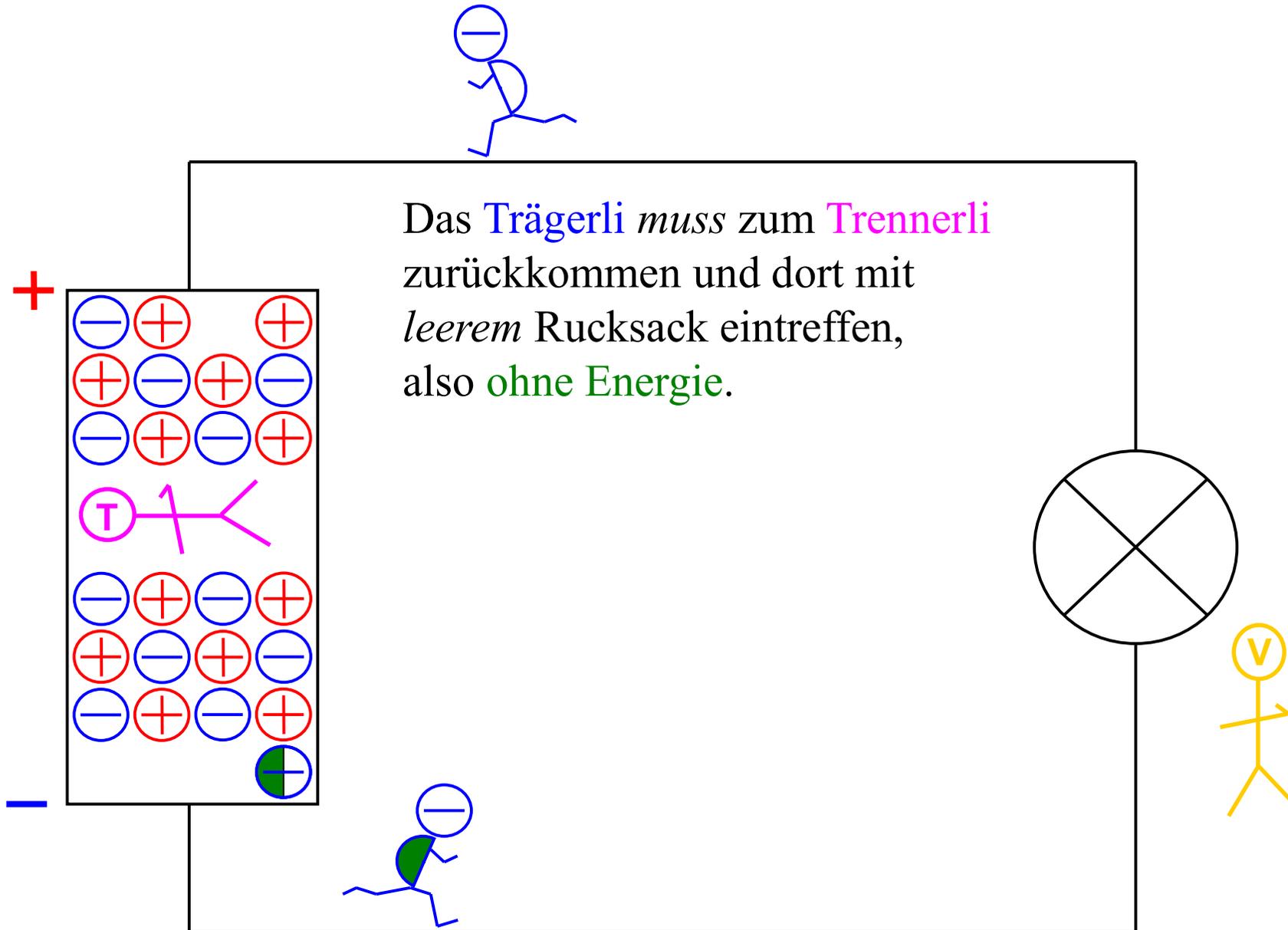


Rucksackmodell

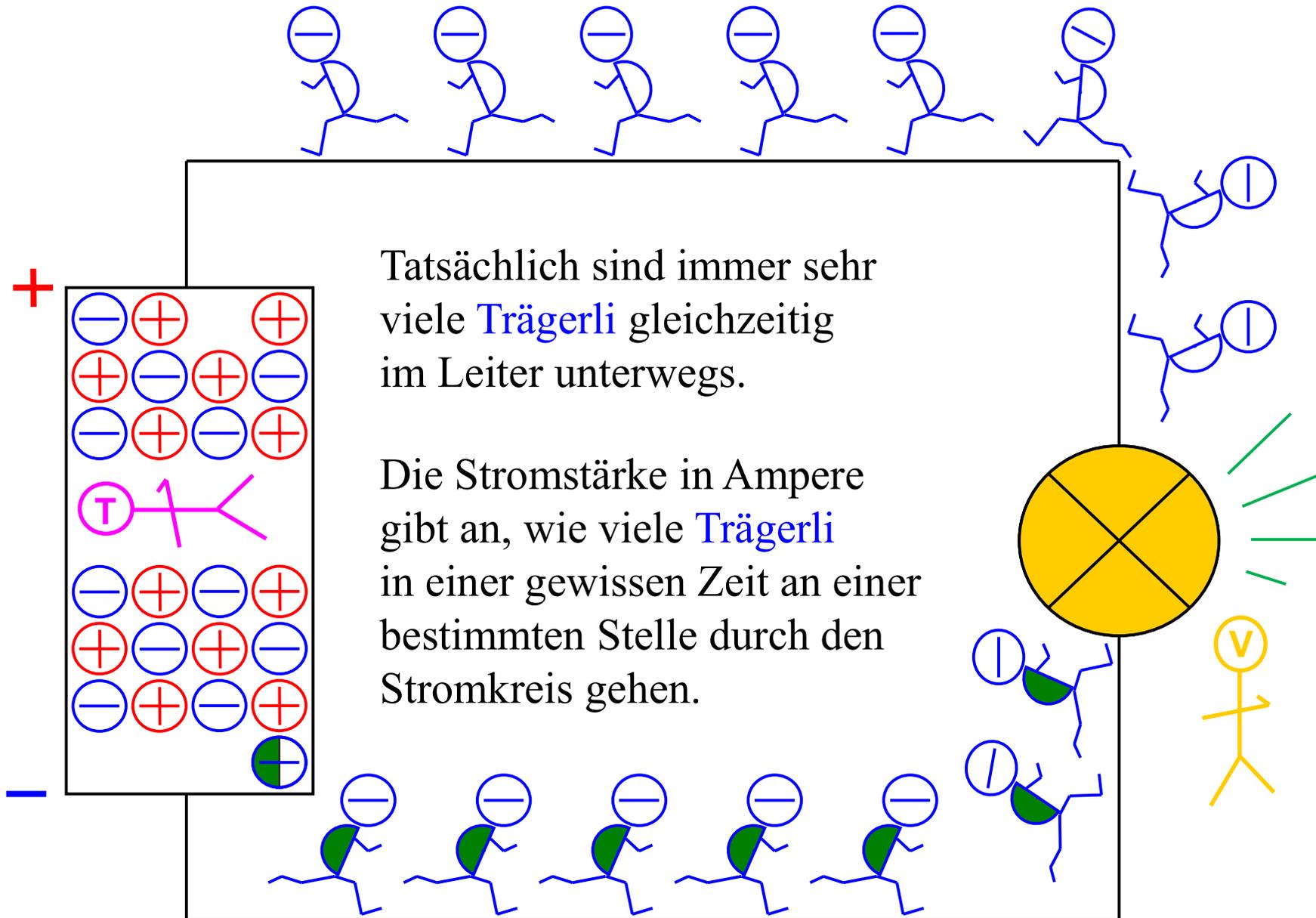


Schalter geschlossen

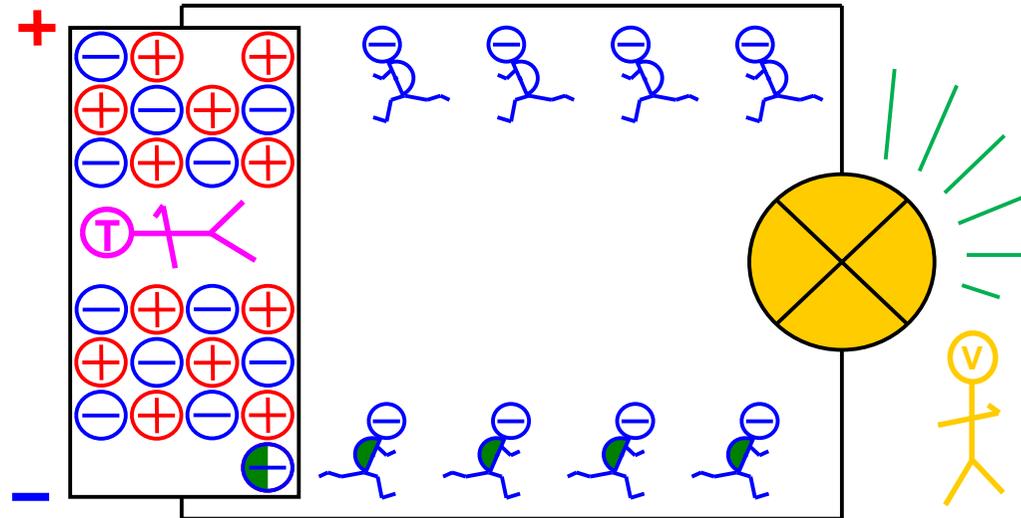
Rucksackmodell



Rucksackmodell



Definition von Spannung und Stromstärke



Die *Spannung* gibt an, wie viel **Energie** die **Trägerli** zwischen zwei verschiedenen Stellen im Stromkreis abgeben oder beim **Trennerli** aufnehmen:

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Energiedifferenz}}{\text{Ladung}} \quad U = \frac{\Delta E}{q}$$

$$\text{Einheit } V \text{ (Volt)} = \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Die *Stromstärke* gibt an, wie viele **Trägerli** in einer gewissen Zeit an einer bestimmten Stelle durch den Stromkreis gehen:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Ladungen}}{\text{Zeit}} \quad I = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$\text{Einheit } A \text{ (Ampere)} = \frac{\text{C}}{\text{s}}$$

Energie oder Arbeit?

Steht das **Trägerli** am Ausgang der Batterie bereit, hat es **Energie** im Rucksack.

Energie ist eine *Zustandsgrösse*.

Wandelt das **Verbraucherli** in einem Motor die **elektrische Energie** in **Bewegungsenergie** um, so verrichtet es **Arbeit**. **Arbeit** ist eine *Prozessgrösse*.

Etwas salopp können wir sagen: «Energie ist gespeicherte Arbeit».

Wird Arbeit verrichtet, ist dafür Energie erforderlich, diese nimmt entsprechend ab.

$$W = \Delta E$$

Energie und Arbeit werden beide in J (Joule) angegeben.

Wir könnten die Spannung daher genau so gut als $\frac{\text{Arbeit}}{\text{Ladung}}$ definieren, also $U = \frac{W}{q}$.

Energieumwandlungskette

Folgende **Energieformen** und **Energiewandler** kommen in unserem Beispiel vor:

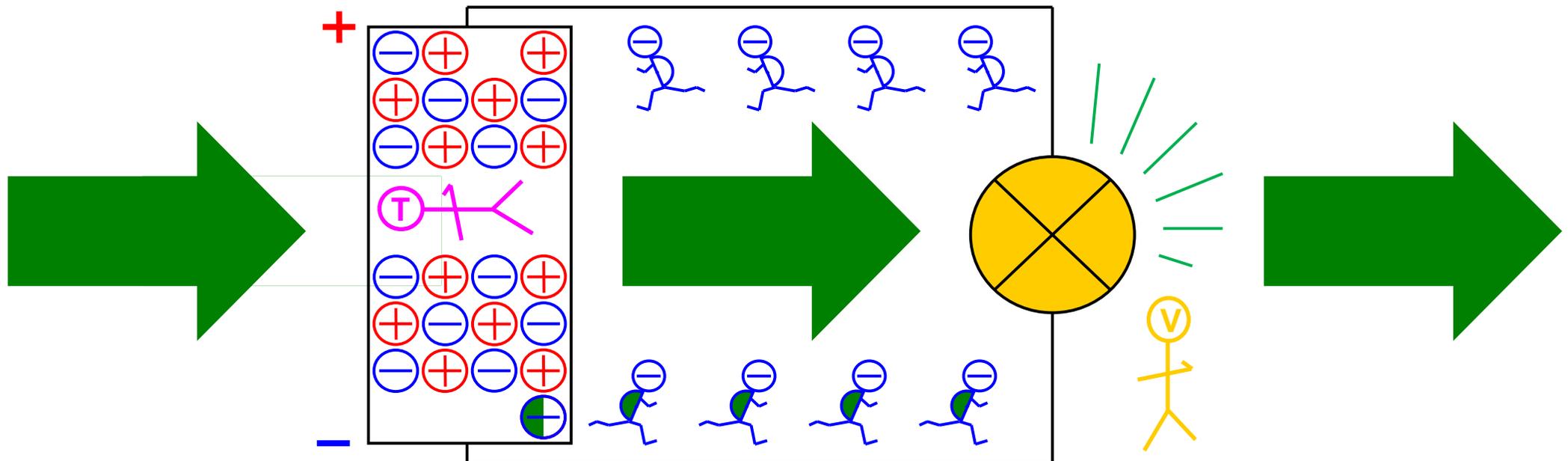
chemische Energie

Batterie

elektrische Energie

Lampe

Licht und Wärme

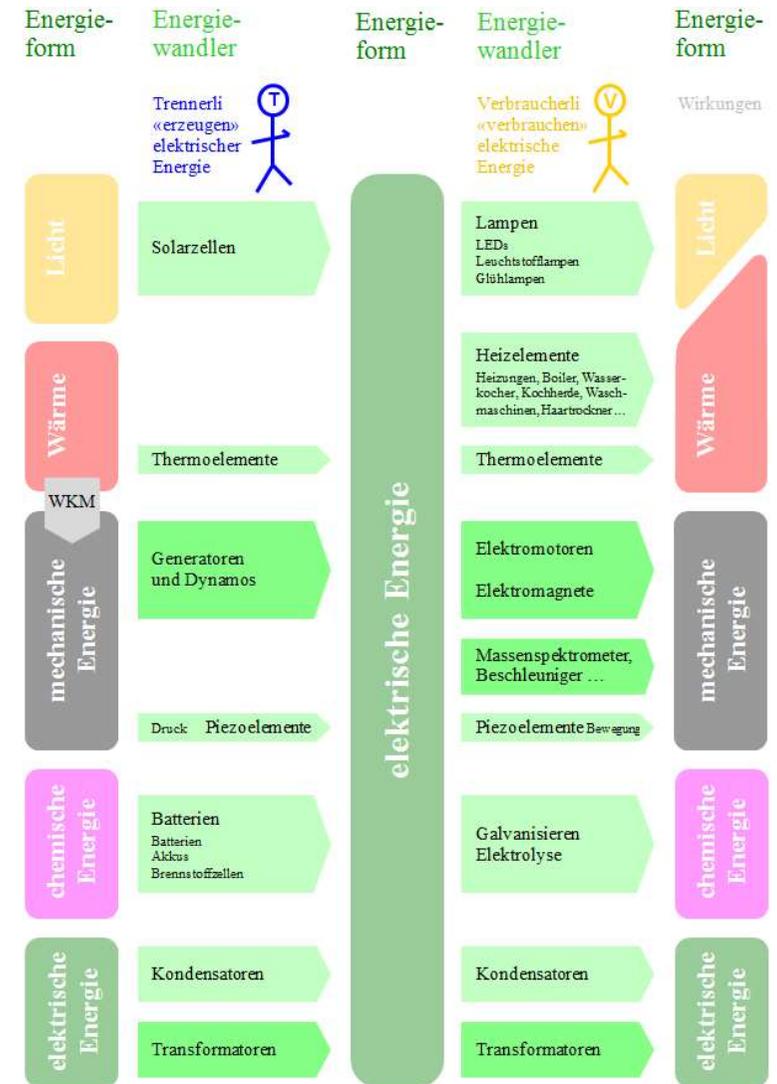


Hier lassen sich die Energiewürfel aus dem NaTech sehr gut einsetzen.

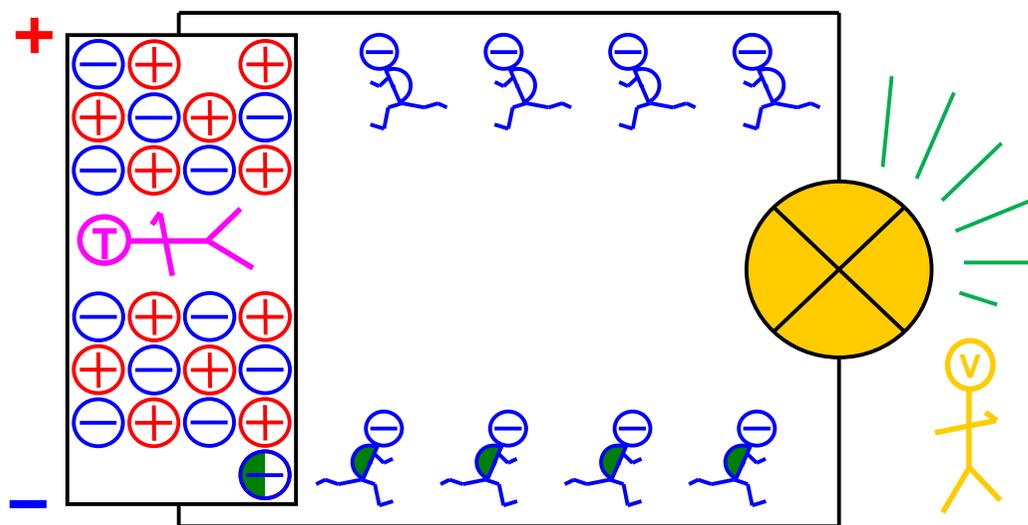
Energieformen und Energiewandler in der Elektrizität

Energie, als fundamentale physikalische Grösse, spielt in allen Teilgebieten der Physik eine zentrale Rolle – auch in der Elektrizität.

Anstelle der auf der Sekundarstufe I häufig genannten Wirkungen der Elektrizität (Wärmewirkung, Lichtwirkung, magnetische Wirkung und chemische Wirkung) könnten vielmehr Energieformen und Energiewandler in den Vordergrund gestellt werden.



«Schülerinnenspur» zum Rucksackmodell



«Energie kommt in die Elektronen. Wenn der Stromkreis geschlossen ist kommen die Elektronen mit der Energie zur Lampe, liefert dort die Energie ab, so funktioniert die Lampe. Die Elektronen gehen dann wieder in das +. In der Mitte ist so ein Teil der + und – trennt und die Mitte verteilt die Energie.»

Energie kommt in die Elektronen. Wenn der Stromkreis geschlossen ist kommen die Elektronen mit der Energie zur Lampe liefert dort die Energie ab, so funktioniert die Lampe. Die Elektronen gehen dann wieder in das +. In der Mitte ist so ein Teil der + und – trennt und die Mitte verteilt die Energie.

Cornelia, 7. Klasse, Schule Lützelflüh, 2016

Animistische Sprache und Vorstellungen

«Alle solchen animistischen Gleichnisse sind erwünscht, aber sie dienen nur, sie können nicht bleiben, sie sind wie der Lehrer selbst: notwendig, um sich entbehrlich zu machen. Sie sind physikalisch illegal. Je gründlicher wir sie aber durchlebt haben, desto leichter fällt es uns, sie, sobald es angebracht ist, zu verlassen, aus ihnen hinauszusteigen in die dünne Luft der physikalischen Abstraktion.»

Martin Wagenschein, Die pädagogische Dimension der Physik, 4. Auflage, 1976, S. 88.

Gleiche Spannung, unterschiedliche Stromstärke



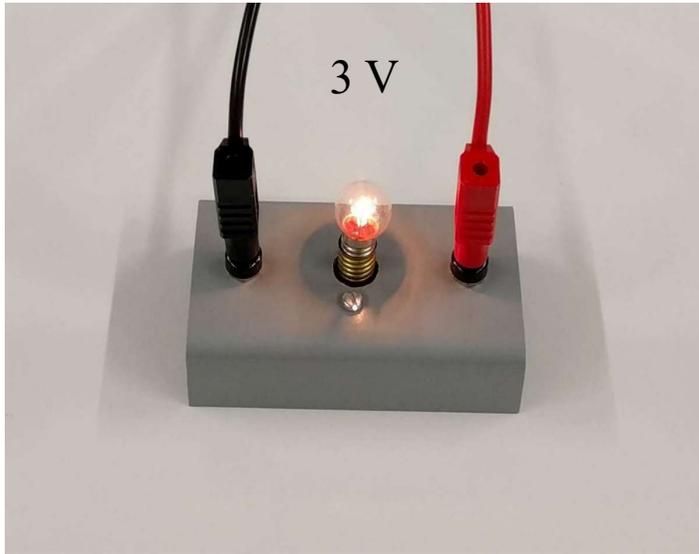
Das **Trennerli** im Fahrraddynamo gibt allen **Trägerli** *gleich viel Energie* in den Rucksack, die sie bei den beiden **Verbraucherli**, dem Scheinwerfer und dem Rücklicht, wieder abgeben. Es gehen in einer bestimmten Zeit *mehr Trägerli* durch den Scheinwerfer als durch das Rücklicht. Der Scheinwerfer vorne am Velo brennt *heller* als das Rücklicht, weil der *grössere* Strom durch ihn fliesst. Die *Glühdrähte* der beiden Lämpchen sind *unterschiedlich*.

Die **Trägerli** erfahren durch den Scheinwerfer einen geringeren Widerstand als durch das Rücklicht.

Der *elektrische Widerstand* R mit der Einheit Ohm Ω ist der Quotient aus Spannung U und Stromstärke I .

$$R = \frac{U}{I}$$

Gleiches Lämpchen an unterschiedlicher Spannung



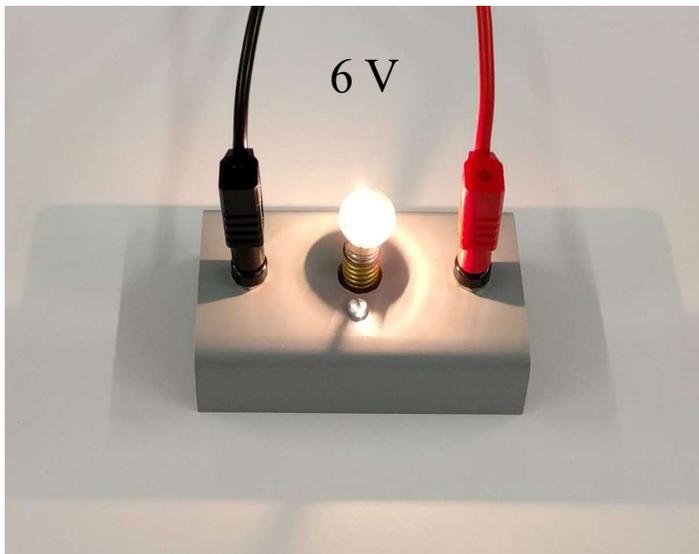
Je *grösser* die Spannung, desto *heller* das Glühlämpchen (bis es schliesslich durchbrennt).

Bei grösserer Spannung gibt das **Trennerli** den **Trägerli** *mehr* **Energie** in den Rucksack.

Kann man daraus eine *Gesetzmässigkeit* zwischen *Spannung* und *Stromstärke* erkennen?

Nein. Wir können nicht wissen, ob immer noch *gleich viele* **Trägerli** im Stromkreis unterwegs sind, einfach mit mehr **Energie** im Rucksack, oder ob nun auch *mehr* **Trägerli** unterwegs sind.

Beides ist denkbar. Dass bei höherer Spannung die Stromstärke *gleich bleibt* oder *zunimmt*. Die Beobachtung und unser Modell helfen uns hier *nicht* weiter.



Zusammenhang Spannung, Widerstand und Stromstärke

Wir müssen messen beispielsweise an einem dünnen Draht, einem Widerstand, einem Glühlämpchen ...

Dann finden wir den zentralen Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke:

Je grösser die Spannung, desto grösser die Stromstärke.

In gewissen Fällen ist der Zusammenhang sogar proportional (Ohm'sches Gesetz).

Zusammenhang zwischen Spannung und Strom im Modell

Je *höher* die Spannung bei gleichem Widerstand, desto *höher* die Stromstärke:

Wenn das **Trennerli** den **Trägerli** mehr Energie in den Rucksack packt, ist ihr «Verlangen», durch den Draht zu fließen, grösser. Das heisst, es gehen in einer bestimmten Zeit mehr **Trägerli** durch den Leiter. Diese Vorstellung folgt nicht unmittelbar aus dem Modell, sie muss angenommen werden.

Je *grösser* der Widerstand bei gleicher Spannung, desto *kleiner* die Stromstärke:

Je grösser der Widerstand durch das **Verbraucherli** auf die **Trägerli**, desto kleiner die Zahl der **Trägerli**, die in einer bestimmten Zeit durch den Draht fließen.

Ein *Strom* kann *nur fließen*, wenn eine *Spannung vorhanden* ist. Die beiden sind *nicht unabhängig*. Wir sprechen von *Ursache* (Spannung) und *Wirkung* (Strom).

Ist kein **Trennerli** vorhanden, das die **Trägerli** trennt und ihnen **Energie** in den Rucksack packt, können sie sich auch nicht auf den Weg machen.

Elektrische Leistung im Rucksackmodell

Die *elektrische Leistung* P gibt an, wie viel *elektrische Energie* in einer gewissen *Zeit* durch einen Verbraucher «verbraucht», das heisst in andere Energieformen umwandelt wird (beispielsweise in Licht und Wärme bei einer Glühlampe). Oder gleichwertig: Die *elektrische Leistung* gibt an, welche *Arbeit* in einer gewissen *Zeit* verrichtet wird.

Je mehr **Energie** die **Trägerli** im Rucksack haben, umso mehr **Energie** können sie an das **Verbraucherli** abgeben. Haben Sie doppelt so viel, geben sie doppelt so viel ab.

Die *elektrische Leistung* ist proportional zur *Spannung* U .

Je mehr **Trägerli** in einer gewissen *Zeit* an einer bestimmten Stelle durch den Stromkreis fließen, umso mehr **Energie** können sie an ein **Verbraucherli** abgeben. Sind es doppelt so viele, geben sie doppelt so viel ab.

Die *elektrische Leistung* ist proportional zur *Stromstärke* I .

Damit ist die elektrische Leistung $P = UI$ mit der Einheit W (Watt).

Serie- und Parallelschaltung

Welche Herausforderungen stellen sich an das Rucksackmodell?

Wie «weiss» ein **Trägerli**, welchen Weg es bei einer Parallelschaltung von zwei Glühlämpchen nehmen muss?

Die Antwort lautet, dass die **Trägerli** die ganze Route «überblicken» müssen, das heisst, sich anzahlmässig auf die beiden Wege aufteilen müssen.

Wie «weiss» ein **Trägerli**, dass es bei einer Serieschaltung von Glühlämpchen beim ersten nur einen Teil seiner **Energie** im Rucksack aufbrauchen darf?

Auch hier muss das **Trägerli** die ganze Route «überblicken», das heisst, seine Energie im Rucksack auf die beiden Verbraucher aufteilen.

Vor- und Nachteile des Rucksackmodells

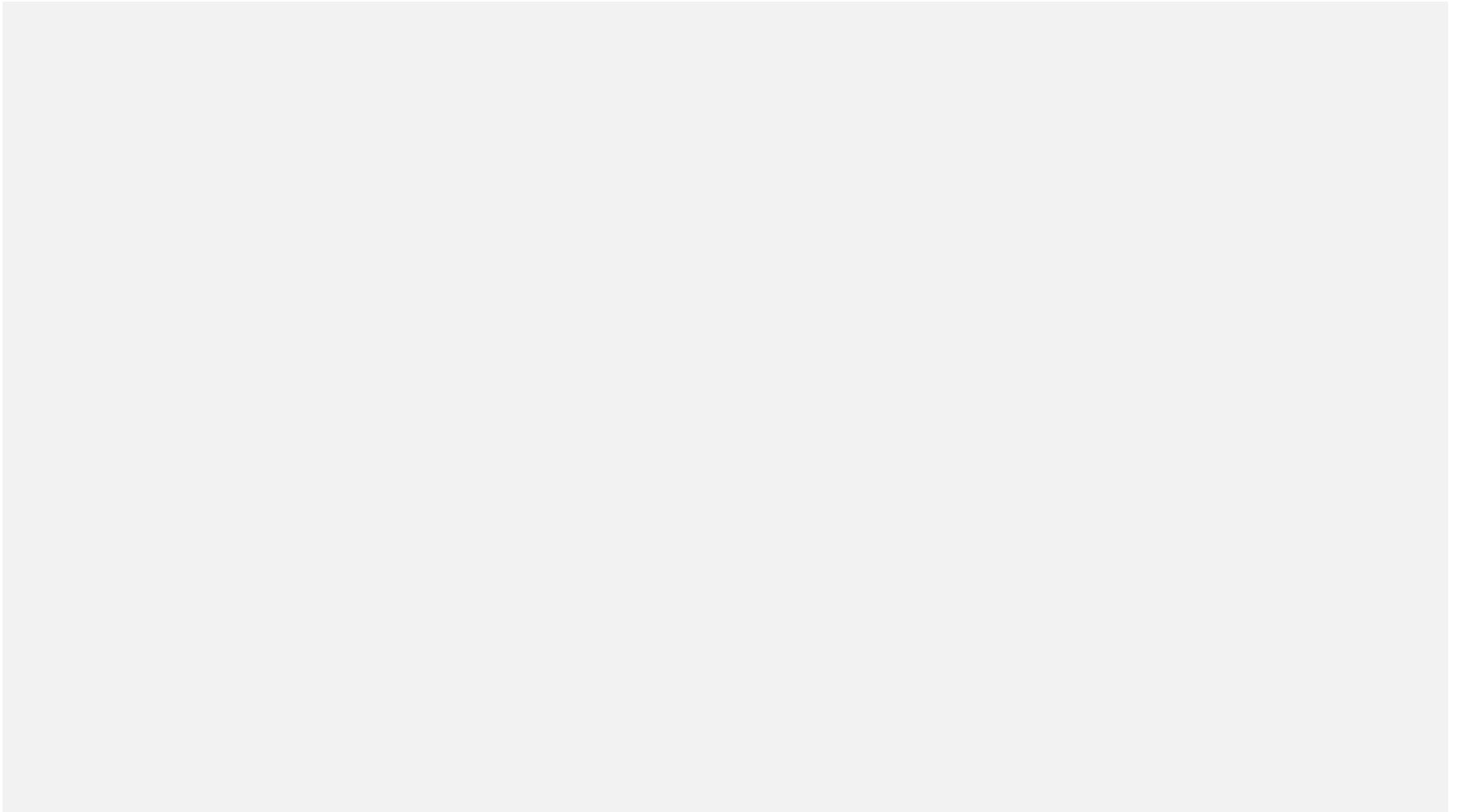
Vorteile:

- Anschaulichkeit.
- Nahe an den physikalischen Definitionen von Spannung und Stromstärke – die Begriffe werden klar getrennt.
- Der Energiebegriff ist zentral.
- Energie (Rucksack) und Ladung (Trägerli) werden deutlich getrennt.
- Die Leistungsformel wird leicht verständlich.
- Hilfreich bei einfachen Schaltungen (Serie- und Parallelschaltung, Messgeräte im Stromkreis).
- Vermeidung des Feldbegriffs.

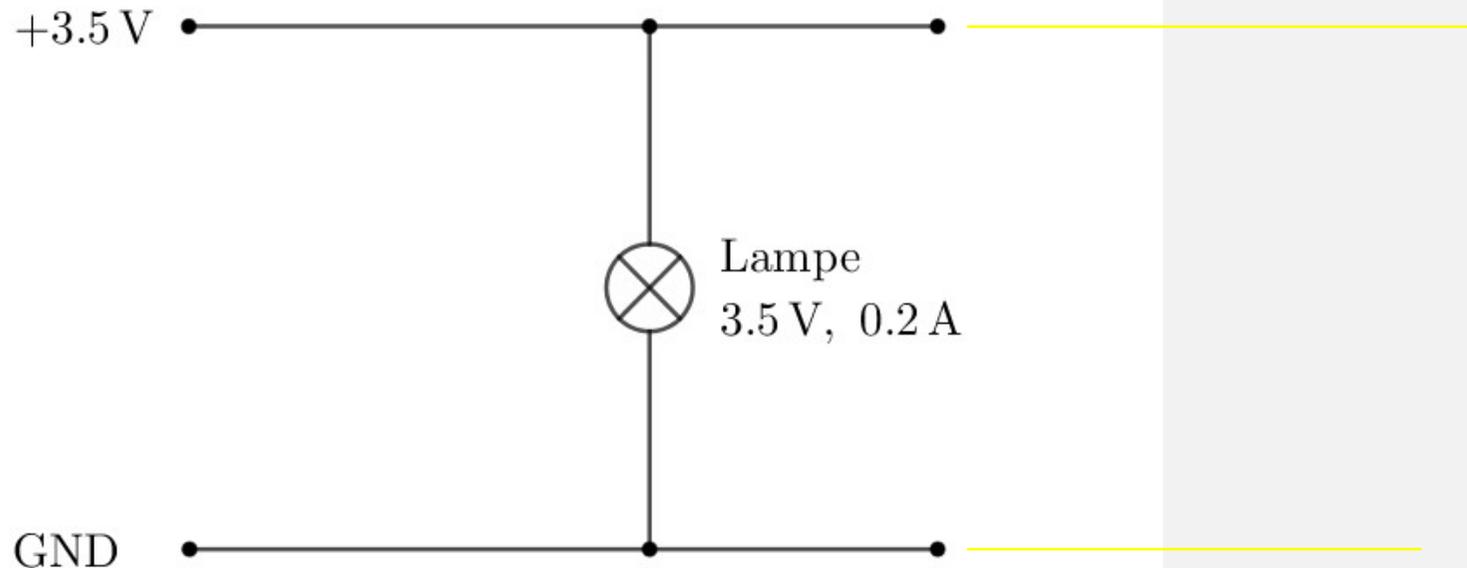
Nachteile:

- Wenig verbreitet (viele Lehrbücher verwenden andere Modelle).
- Der Systemcharakter eines Stromkreises wird nicht sehr deutlich.
- Langsame Bewegung der Ladungen im Vergleich zum schnelle Energie-transport.
- Physikalische Stromrichtung.
- Trägerli müssen den ganzen Weg «überblicken», sich und ihre Energie aufteilen.
- Nicht geeignet in der Elektronik (Dioden, Transistoren).

Wasserhöhenmodell



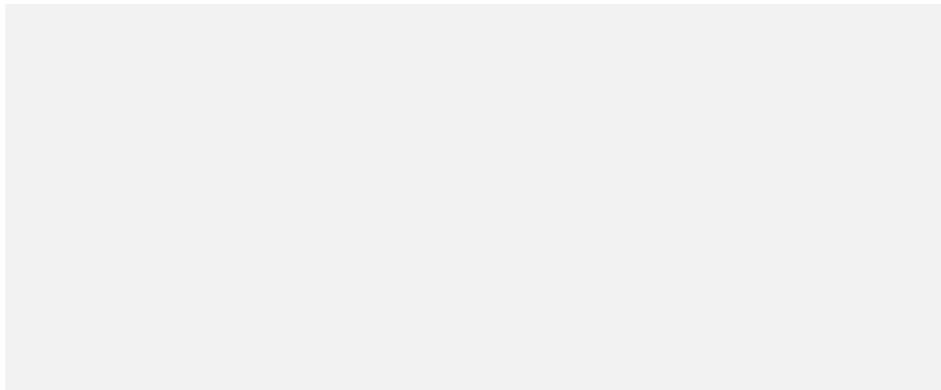
Wasserhöhenmodell



In der Elektronik (Dioden, Transistoren) ist das *Wasserhöhenmodell* hilfreich, das den geschlossenen Stromkreis weniger mehr im Vordergrund hat und bereits stärker auf den Potential-Begriff abzielt.

Weitere Modelle

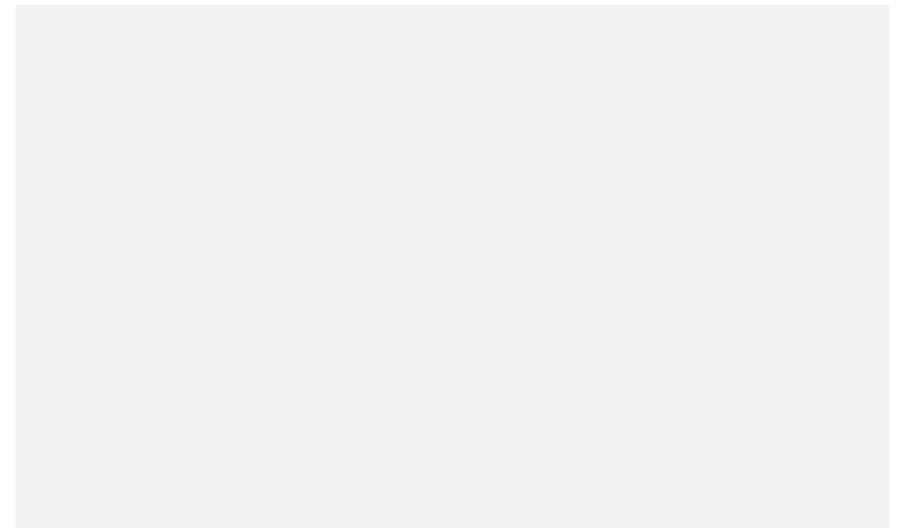
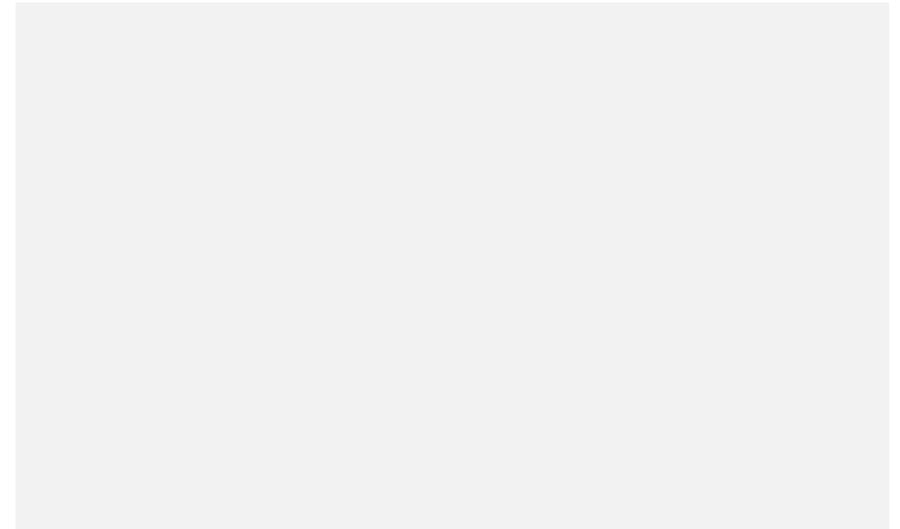
Elektronengasmodell (oben rechts), *Stäbchenmodell* (unten rechts), Modell aus den Unterlagen zur ELEXBO (unten links).



Die Spannung in Volt zeigt, wie stark die Elektronen durch den Draht gedrückt werden.

Der Strom in Ampere zeigt, wie viele Elektronen durch den Draht fließen.

Der Widerstand in Ohm zeigt, wie stark die Elektronen gebremst werden.



Kleine Experimente

Bei den kleinen Experimenten rund um den Stromkreis geht es in erster Linie darum, die beobachteten Phänomene mit dem Rucksackmodell oder einem anderen, bevorzugteren Modell zu erklären.

Wo gelingt das gut, wo weniger?

Wo also sind die Stärken, wo die Grenzen der Modelle?

Rollenspiel zum Rucksackmodell

Material:

- Süssigkeiten (Ricola, Sugus ...)
- Malerabdeckband

Rollen:

- Trennerli
- 1-3 Verbraucherli
- viele Trägerli
- ev. positive Ladungen

Das Trennerli trennt die Trägerli und übergibt ihnen Energie (eine gewisse Anzahl Süssigkeiten, 1-12 Stück). Die Trägerli machen sich auf den Weg durch den Stromkreis (einfach, seriell, parallel). Beim Verbraucherli müssen sie einen Teil der Energie geben, um den Widerstand zu überwinden.

Am Schluss können die Süssigkeiten in der ganzen Klasse verteilt werden.

Als Rollenspiel umgesetzt, generiert das Rucksackmodell viele SuS-Fragen.

FAQs zum Rucksackmodell

- Wie schnell bewegen sich die Trägerli? Dürfen sie überholen?
- Wenn ich den Schalter öffne, haben die Trägerli zwischen dem Schalter und dem Verbraucherli doch einen leeren Rucksack?
- Was passiert, wenn kein Verbraucherli da ist?
- Brauchen die Trägerli nicht auch selber Energie? Wenn der Rucksack ganz leer ist, kommen sie doch nicht mehr durch die Rückleitung?
- Die Energie, die in den Rucksack gepackt wird, also die Spannung, ist abhängig vom Trennerli. Weshalb können einige Trennerli mehr Energie einpacken?
- Ab wann ist der Rucksack voll?
- Was passiert bei Wechselspannung?

Ein Multimodell-Ansatz, um die Phänomene zu erklären?

Zyklus 2	Wasserkreislauf	Stromkreis, Systemcharakter
Zyklus 3 Elektrizität	Rucksackmodell	Spannung und Stromstärke, Energieformen und -umwandlungen
Zyklus 3 Elektronik	Wasserhöhenmodell	technische Stromrichtung, Diode, Transistor