

# Verständliche Elektrizitätslehre

D. Plappert

## 1 Vorbemerkungen

Obwohl im Gegensatz zu vielen Gebieten der Physik die Maßeinheiten der entscheidenden physikalischen Größen der Elektrizitätslehre wie Volt, Watt, Ampere, kWh im Alltag recht gebräuchlich sind, gelingt es nur schwer, die Schülerinnen und Schüler durch den Physikunterricht anzuregen klare, stabile und tragfähige Anschauungen und Konzepte dieser Größen aufzubauen. Erschwerend kommt hierbei sicherlich hinzu, dass nicht nur im täglichen Leben sondern auch in der „fachlichen Literatur“ diese Begriffe oft unscharf bzw. falsch verwendet werden:

„... Elektronische Schaltungen sind zumeist sehr sparsam im Energieumsatz, doch ganz ohne elektrischen Strom geht's halt nicht und den musst du kaufen. Alle Schaltungen in diesem Buch funktionieren mit 4,5 – 6 V; und der Strom durch den Heizwiderstand beträgt max. 0,6 A. Als Stromquellen bieten sich an: Batterien, Akkus, Netzteile ...“ [1]. „Der landesweiten Stromversorgung und dem einfachen Stromkreis, den wir im Unterricht aufbauen werden, liegt das gleiche Schema zugrunde: An einer Stelle wird „Strom“ erzeugt, wird transportiert und an anderer Stelle genutzt.“ [2].

In allen Beispielen wird das Wort „elektrischer Strom“ nicht mit seiner physikalischen Bedeutung von „Strom elektrischer Ladung“ sondern eher in der von „Energie“ verwendet, ohne dass darauf explizit hingewiesen wird.

Im Folgenden soll zunächst der Zusammenhang der für die Elektrizitätslehre charakteristischen physikalischen Größen dargestellt werden. Dann soll herausgearbeitet werden, wie mithilfe von Wasserstromkreisen der alltagsprachliche „Strömungsbegriff“ allmählich zu einem physikalischen „Strombegriff“ geschärft werden kann. Das „Energie-Träger-Konzept“ und das „Strom-Antrieb-Konzept“ dienen dabei als entscheidende begriffliche „Bilder“, um den Zusammenhang der zentralen physikalischen Größen so in einem Anfängerunterricht einzuführen, dass sie tragfähig bleiben für die gesamte Schulzeit und dass auch im späteren Leben noch weiter auf sie aufgebaut werden kann.

## 2 Die zentralen physikalischen Größen der Elektrizitätslehre und ihr Zusammenhang

In jedem Gebiet der Physik gibt es einige physikalische Größen, die von zentraler Bedeutung sind. Dabei spielt die Größe Energie  $E$  und ihr Strom  $P = \Delta E / \Delta t$  eine Sonderrolle, da sie diese Bedeutung nicht nur in fast allen Gebieten der Physik sondern auch in vielen Bereichen sämtlicher Naturwissenschaften inne hat. Abb. 2 soll die Vernetzung die-

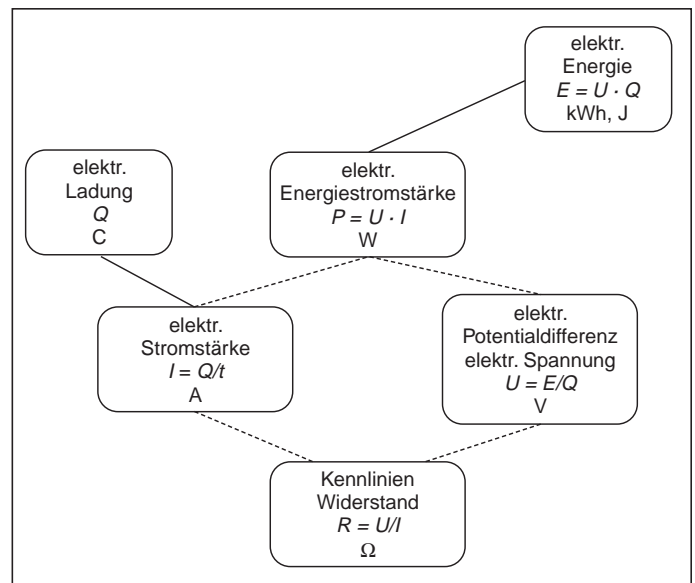
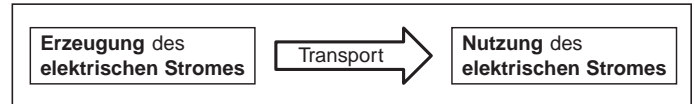


Abb. 1 (oben): Schematische Darstellung der „Stromversorgung“

Abb. 2 (Mitte): Die Vernetzung der zentralen physikalischen Größen der Elektrizitätslehre

Abb. 3 (unten): Kann Strom verschwendet werden?

# Die Sonne passt auf!

## Solarweidezaungerät

Euro Guard A 2500. Das neue vielseitige 12-V-Akkugerät für den Allrounderbetrieb. Für den Betrieb wird eine 12-V/70-Ah-Nassbatterie empfohlen. Gehäuse aus bruchsicherem Kunststoff. Ein-/Aus-Schalter und stabilen Pol-Anschlussklemmen. Geeignet auch zur Anwendung für Schafnetze. Spritzwassergeschützt, bewuchsunempfindlich. Lieferung ohne Solarmodul und ohne Solarakku.

**Technische Daten:** Ladeenergie (Joule): 2,0 J · Entladeenergie 1,5 J · Leerlaufspannung: 8200 V · Spannung bei 500 W: 4900 V · Stromaufnahme 0,16 A · Zaunlänge nach CEE: 45 km · ohne Bewuchs: 10 km · leichter Bewuchs: 4 km · starker Bewuchs: 1,5 km · Artikel-Maß: (L x B x H) 220 x 110 x 260 mm.

**11 35 30-11** € 204,49

Passendes Solarmodul 12 W

**11 34 41-11** € 195,95

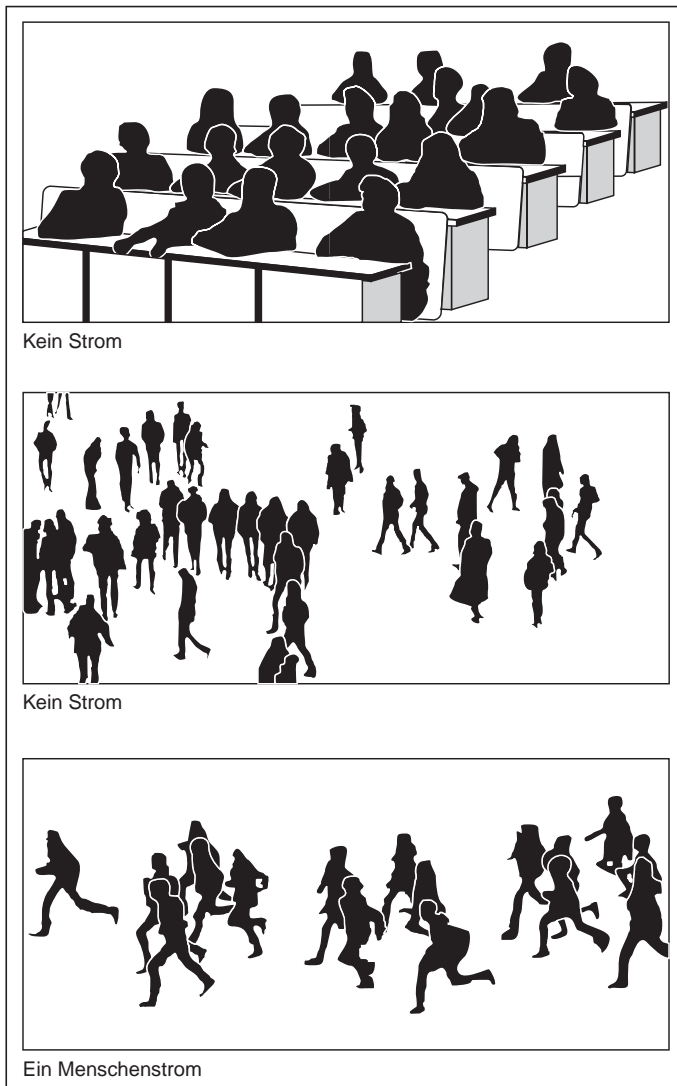


Abb. 4: Ist hier irgendwo „Strom drauf“?

ser Größen andeuten. Zwei Verbindungen sind grafisch hervorgehoben: Die Verbindung von  $P$ ,  $I$  und  $U$ , die durch die Gleichung  $P = UI$  und die Verbindung von  $I$  und  $U$ , die im Allgemeinen durch eine Kennlinien beschrieben wird. Im speziellen Fall der linearen Abhängigkeit wird die letztgenannte Verbindung durch die Gleichung  $U = RI$  symbo-

lisiert, wobei  $R$  für den elektrische Widerstand steht. Erst wenn das ganze Beziehungsgeflecht unterrichtet ist, können die grundlegenden Phänomene der Elektrizität vollständig verstanden werden.

Abb. 5: Ein Schülerstrom



### 3 Die zwei Wurzeln des alltagssprachlichen „Strömungsbegriffs“

Im Alltag sprechen wir von den verschiedensten Strömen, wie etwa von Luft-, Wasser-, Licht-, Geld-, Auto-, Menschen-, Informations-, ...strömen, ohne dass uns bewusst ist, worauf es beim Strömen eigentlich ankommt. Wie verschwommen der umgangssprachliche „Strombegriff“ ist, zeigen die Abb. 3 und 4.

Was heißt eigentlich „es strömt“? Betrachten wir die Schülerinnen und Schüler in Abb. 5. Wann „strömen“ sie? Sie strömen,

- wenn sie sich bewegen *und*
- denselben Weg nehmen.

Diese Bedeutung von „Strom“ wenden wir im Alltag für solche Ströme an, bei denen das Strömende „quantisiert“ ist, wie etwa bei Menschen- oder Autoströmen. Dies ist die erste Wurzel des alltagssprachlichen Strömungsbegriff.

Bei anderen Strömen, wie etwa bei Wasser- und Luftströmen, gehen wir im Alltag anders vor: strömt Wasser aus einem Wasserhahn bzw. Luft aus einem Fahrradventil, so denken wir uns das Wasser nicht in Wassertropfen bzw. Wassermoleküle „portioniert“, sondern wir sehen das Wasser als eine Art Kontinuum an.

Diese zweite Wurzel des alltagssprachlichen Strömungsbegriffs, soll nun im Weiteren zu einen physikalischen Strombegriff geschärft werden.

### 4 Der „fluidale Strömungsbegriff“

Betrachten wir den in Abb. 6 dargestellten Versuchsaufbau: Zwei Gefäße [3] mit angefärbtem Wasser, in denen Wasser unterschiedlich hoch steht, sind durch einen Schlauch miteinander verbunden. Öffnen wir beide Hähne, so sehen wir das Wasser nicht strömen. Wir sehen aber, dass der Wasserpiegel in dem einen Gefäß steigt, während er in dem ande-

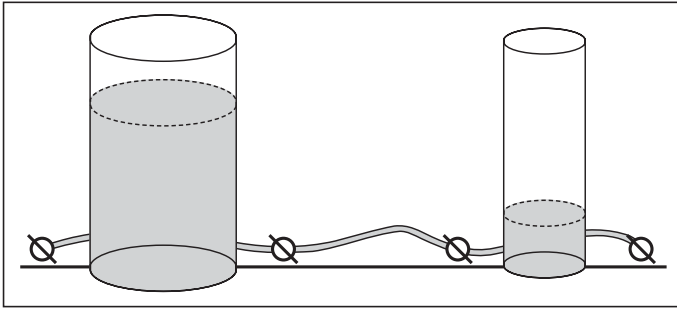


Abb. 6: Zwei wassergefüllte Behälter sind durch einen Schlauch miteinander verbunden.

ren sinkt. Daraus schließen wir: Wasser strömt durch den Verbindungsschlauch von dem einen Gefäß in das andere. Da wir intuitiv von der Erhaltungseigenschaft des Wassers ausgehen, sagen wir: die Wassermenge  $\Delta W$ , um die die Wassermenge  $W$  in dem schmalen Gefäß pro Zeiteinheit zugenommen hat, ist durch den Schlauch in das Gefäß hineingeströmt; als Stromstärke  $I_W$  definieren wir:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = I_W.$$

Dies ist eine Kontinuitätsgleichung.

Da der Wasserschlauch von Anfang an mit Wasser gefüllt ist und Wasser inkompressibel ist, können wir sagen: die Stärke des Wasserstroms  $I_W$  ist an jeder Stelle des Schlauches gleich.

Abb. 8 (oben): Eine Schülerzeichnung

Abb. 9 (unten): Wasserrad mit Gabellichtschranke

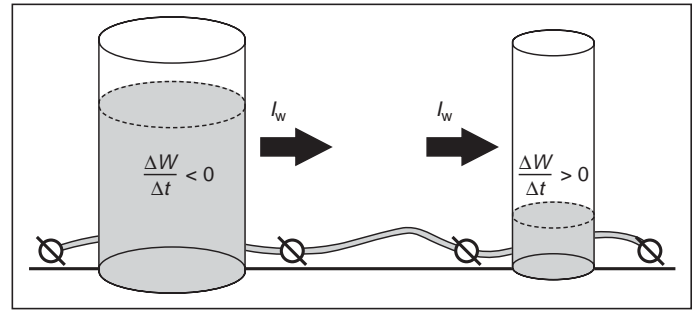
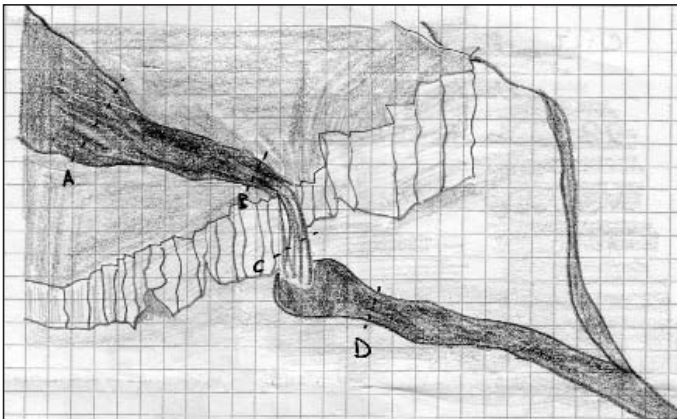


Abb. 7: Zur Definition der Wasserstromstärke

Der Name „Stromstärke“ für  $I_W$  ist etwas unglücklich gewählt, da er im alltäglichen Sprachgebrauch Assoziation wie „Kraft“ bzw. „Geschwindigkeit“ weckt. Die Kontinuitätseigenschaft des Wassers gerät dabei leicht in den Hintergrund. Deshalb ist es unumgänglich diese Begriffe im Unterricht gegeneinander abzugrenzen, etwa durch das in Abb. 8 dargestellte Beispiel:

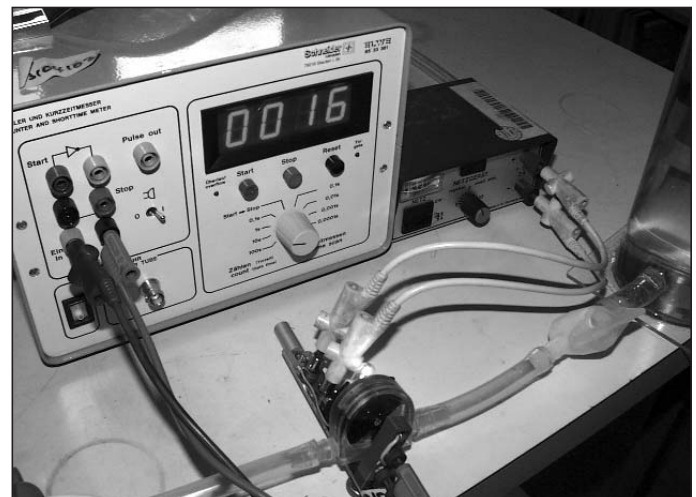
Die Wasserstromstärke  $I_W$  ist an den Stellen A bis D gleich, die Geschwindigkeit und damit die Kraft des Wassers ist sicher an der Stelle C am größten. Durch den Zufluss wird die Wasserstromstärke jedoch erst flussabwärts größer.

Um die Stärke eines Wasserstroms zu messen, der durch eine Leitung hindurch fließt und der sich auch noch zeitlich ändern kann, ist die Gleichung  $\Delta W / \Delta t = I_W$  sehr unpraktisch. Bauen wir ein Wasserrad in die Leitung ein, so erhalten wir ein „Stromstärkemessgerät“, bei dem die Drehzahl proportional zu der Wasserstromstärke ist. Um die „momentane“ Wasserstromstärke zu ermitteln, können wir mithilfe einer Gabellichtschranke, eines Zählers und eines Messwerterfassungsprogramms das „Wasserrad“ „eichen“: mithilfe eines Messbechers ermitteln wir die Flüssigkeitsmenge, die eine einmalige Unterbrechung der Lichtschranke zur Folge hat. Multiplizieren wir die Impulsrate mit dem so ermittelten Eichfaktor, erhalten wir die Wasserstromstärke, beispielsweise in der Maßeinheit ml/s. Wie Abb. 11 zeigt, werden solche Geräte auch in der Industrie verwendet.

Fassen wir unseren momentanen „fluidalen“ Strömungsbegriff, der für alle Stoffströme verallgemeinert werden kann, zusammen:

Nimmt in einem System die Menge eines Stoffes X, den wir als Kontinuum betrachten und für den wir eine Erhaltung annehmen, in einer Zeiteinheit  $\Delta t$  um den Wert  $\Delta X$  zu, so

Abb. 10: Die Gabellichtschranke ist an einem Zähler angeschlossen



sagen wir, in das System ist ein Strom der Stärke  $I_X$  hinein geströmt und es gilt die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = I_X.$$

### 5 Experimente mit Wasserstromkreisen

Mit Wasserströmen können modellhaft viele Eigenschaften von Strömen untersucht werden. Dabei ist es wichtig reale Experimente durchzuführen. Meine Erfahrungen haben gezeigt, dass es selbst dann noch für die Schülerinnen und Schülern schwierig genug ist, sich stabile Stromkonzepte zu bilden. Werden Analogien zwischen Wasserströmen und elektrischen Strömen nur an Zeichnungen erzählend entwickelt, so ist dies fast wirkungslos. Auf das Erwähnen dieser Analogie kann dann vollständig verzichtet werden. Dass solche Analogien weit tragen, wenn sie physikalisch sinnvoll gebildet werden, wird in [4] gezeigt.

#### 5.1 Die Druckdifferenz als Antrieb

Wie lange strömt das Wasser in Abb. 6 von dem einen Behälter in den anderen? Intuitiv ist für alle Schülerinnen und Schülern klar, dass das Wasser strömt, solange es eine Druckdifferenz  $\Delta p$  gibt. Das Problem ist nur: hängt der Wasserdruck von der Höhe oder vom Volumen der Wassersäule ab. Selbst Oberstufenschüler sind hier unsicher, ob der schmale Behälter nicht irgendwann überläuft. Der Versuch zeigt dann, dass die Höhendifferenz  $\Delta h$  ein Maß für die den Wasserstrom antreibende Druckdifferenz  $\Delta p$  ist. Kommunizierende Röhren zeigen, dass der Druck in einer Wassersäule nicht von der Wassermenge, also nicht von der Form des Gefäßes, sondern nur von der Wasserhöhe, bzw. -tiefe abhängt. Dies kann auch mit einem digitalen Druckmesser demonstriert werden.

#### 5.2 Der geschlossene Wasserstromkreis

In den zuvor beschriebenen Versuchsaufbau kann eine zweite Leitung mit Pumpe als „Rückleitung“ eingebaut werden. Es entsteht ein Stromkreis. Die Flüssigkeitsspiegel in den beiden Gefäßen ändern sich so lange, bis sich ein stabiles Strömungsgleichgewicht eingestellt hat. Dann ist die Wasserstromstärke in Hin- und Rückleitung gleich. Dieser Wasserstromkreis eignet sich jedoch nicht als Modell eines geschlossenen elektrischen Stromkreises: das Schließen eines Hahns in einer der Leitungen unterbricht nicht sofort den Wasserstroms in allen Leitungen. Öffnen wir entsprechend in einem einfachen elektrischen Stromkreis einen Schalter, so hört der elektrische Strom an jeder Stelle sofort auf zu fließen.

#### 5.3 Der Modellstromkreis

Die Schülerinnen und Schüler haben in der Regel keine Alltagserfahrungen mit geschlossenen Stromkreisen, in denen etwas „Inkompressibles“ strömt. Solche Erfahrungen können mit dem folgenden Modellstromkreis [5] gemacht werden: gefärbtes Wasser befindet sich in durchsichtigen PVC-Schläuchen. Wird das Wasser durch eine elektrische Pumpe in Bewegung gesetzt, so ist die Drehzahl der „Wasserrädchen“ A bis D ein Maß für die Wasserstromstärke an

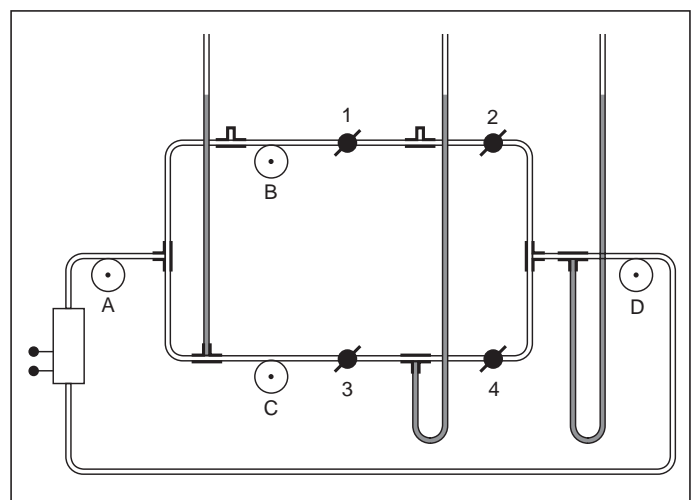
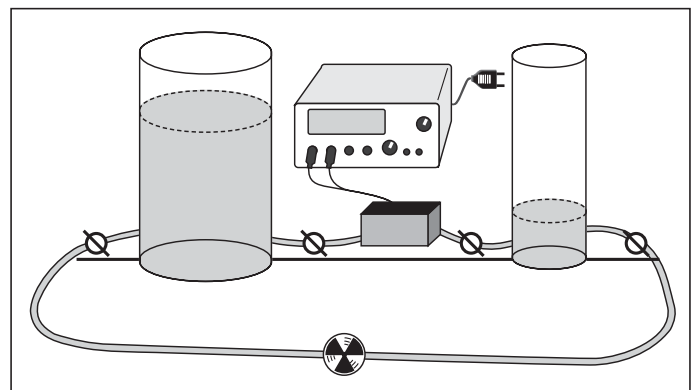
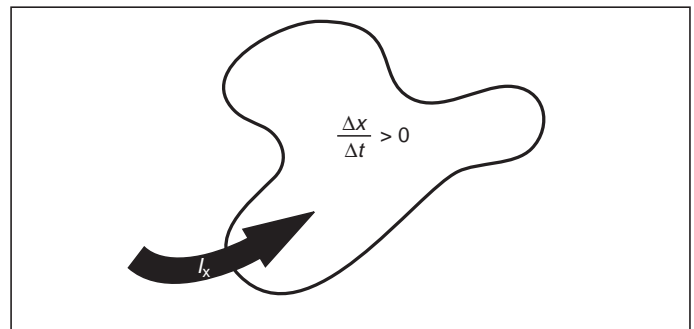
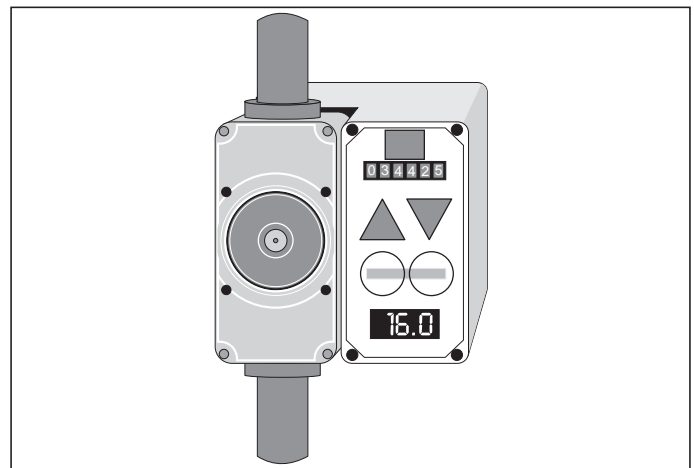


Abb. 11 (oben): Ein industrielles Wasserstromstärkemessgerät

Abb. 12 (Mite oben): Zur Definition der Stromstärke bei Stoffströmen

Abb. 13 (Mitte unten): Ein erster Wasserstromkreis

Abb. 14 (unten): Der Modellstromkreis

den jeweiligen Stellen. Der Strömungswiderstand des Wasserstroms kann durch die Wasserhähne 1 bis 4 verändert werden. Die obere Öffnung der drei senkrechten „Manometerschläuche“ kann verschlossen werden; so dass sie außer Betrieb sind. Einige mit diesem Modellstromkreis mögliche Versuche seien im Folgenden dargestellt.

- **Der unverzweigte Stromkreis**  
Alle Manometer und die Hähne 1 und 2 sind geschlossen. Bevor die Pumpe in Betrieb gesetzt wird, wird mit den Schülerinnen und Schülern darüber diskutiert, in welcher Reihenfolge die Stromstärkemesser sich beim Einschalten zu drehen beginnen. Es zeigt sich, dass trotz der Vorversuche viele Schülerinnen und Schüler noch keine stabile „Kontinuitätsvorstellung“ gebildet haben. Viele denken, dass sich das Rad A zuerst zu drehen beginnt. Ein kurzes Unterrichtsgespräch genügt dann aber, dass allen Schülerinnen und Schülern verständlich wird, dass in einem unverzweigten, geschlossenen Stromkreis das Wasser nur an allen Stellen gleichzeitig zu strömen beginnen kann.
- **Der Stromkreis reagiert als Ganzheit**  
Im unverzweigten Stromkreis seien die Manometerschläuche weiterhin geschlossen. Mit der Hand bzw. mit einer kleinen Schraubzwinge wird der Schlauch an irgendeiner Stelle zusammengedrückt. Überall im Stromkreis nimmt die Stärke des Wasserstroms ab. Das Wasser staut sich nicht an einer irgendeiner Stelle. Das geht im unverzweigten Stromkreis nicht. Der Stromkreis reagiert auf lokale Störungen als Ganzheit.
- **Der verzweigte Stromkreis**  
Die Manometerschläuche seien weiterhin geschlossen, die Hähne 1 bis 4 zunächst geöffnet. Rad A und D zeigen dieselbe Wasserstromstärke an, Rad B und C drehen sich deutlich langsamer. Es ist sofort verständlich, dass die Stärke des Wasserstroms vor der Verzweigung genau so groß ist wie die Summe der Wasserstromstärke in den beiden Zweigen. Die Knotenregel kann so auf selbstverständlichem Weg gefunden werden. Durch die Stellung der Hähne kann die Aufteilung des Wasserstroms in den beiden Zweigen variiert werden.
- **Der Widerstand**  
Die Hähne 1 und 2 sind geschlossen. Die Manometerschläuche werden geöffnet [6]. Es kann gezeigt werden, dass der Druck längs der unteren Leitung abnimmt. Wird einer der Hähne langsam geschlossen, so vergrößert sich die Druckdifferenz am jeweiligen Hahn. Der Schlauch hat einen größeren Strömungswiderstand bekommen. Dieser ist um so größer, je kleiner die zur Verfügung stehende Fläche der Durchlassöffnung ist.
- **Reihenschaltung von Widerständen**  
Im unverzweigten Stromkreis mit geöffneten Manometerschläuchen wird die Stellung der beiden Hähne verändert; es zeigt sich, dass der Gesamtwiderstand um so größer ist, je größer die Einzelwiderstände sind.
- **Parallelschaltung von Widerständen**  
Im unverzweigten Stromkreis mit geöffneten Manometern sind die Hähne 1 und 2 ganz und die Hähne 3 und 4 teilweise geschlossen. Werden nun die Hähne 1 und 2 teilweise geöffnet, so zeigen die Strömungsmesser A und D an, dass die Stromstärke zunimmt. Obwohl sich in dem Wasserstromkreis nun „mehr Widerstände“ befinden, wird der Gesamtwiderstand des Stromkreises durch die Parallelschaltung kleiner.
- **Quantitative Versuche**

Die zuvor beschriebenen Versuche sind in erster Linie als „qualitative“ Versuche gedacht.

Quantitative Messungen können in gewissen Grenzen mit dem zuvor beschriebenen „Wasserstromstärkemesser“ und einem  $\Delta p$ -Messgerät (z. B. Cassy) durchgeführt werden. So können auch  $\Delta p$ - $I_W$ -Kennlinien aufgenommen werden.

Es würde aber den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen, auf weitere modellhafte Eigenschaften von Wasserströmungen einzugehen.

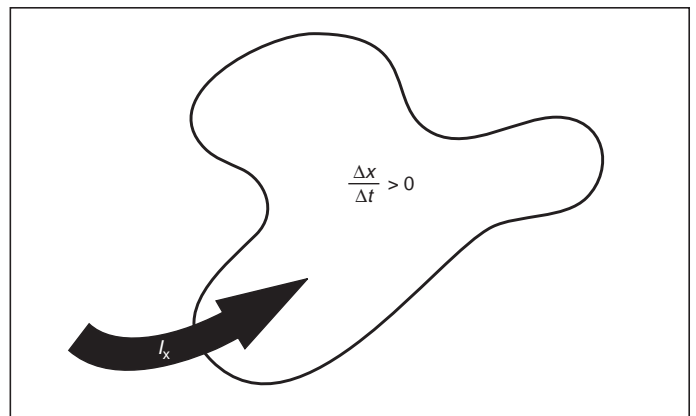
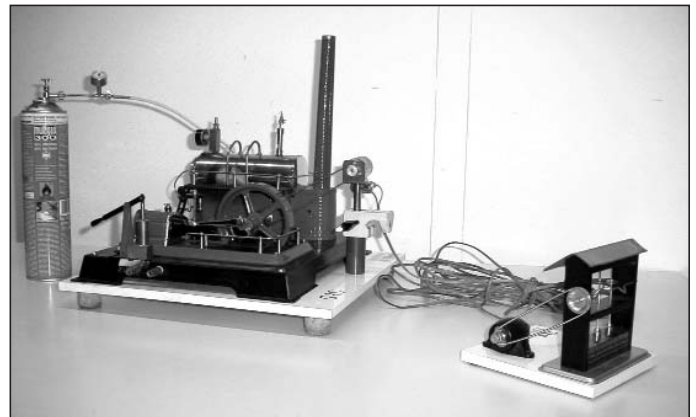
Die mithilfe des Modellstromkreises durchgeführten Versuche verdeutlichen,

- dass Stromkreise als Ganzheit („Kontinuitätseigenschaft“) reagieren und
- dass die Differenz des Drucks den Wasserstrom antreibt („Strom-Antrieb-Konzept“).

Diese zwei Eigenschaften von Wasserströmen sind nur mit dem „fluidalen Strömungsbegriff“ verständlich und erlebbar. Diese zweite Wurzel des alltagssprachlichen Strömungsbegriffs nützen fast alle Schulbücher bei der Einführung des elektrischen Stromkreises aus. Im weiteren Verlauf wird dann aber diese Vorstellung verlassen. Es werden dann statt der elektrischen Ströme die Ströme von Ladungsträgern (meist Elektronen) betrachtet. Mit Teilchenvorstellungen werden dann die Phänomene der Elektrizitätslehre beschrieben, und so auf die erste Wurzel des alltagssprachlichen Strömungsbegriffs zurückgeführt. Auf diese Weise sind dann aber Stromkreise nicht mehr als „Ganzheit“, d. h. als System erlebbar, statt „systemisches Denken“ wird dann „punktuell Denken“ gefördert.

**Abb. 15 (oben): Eine gasbetriebene Dampfmaschine treibt über einen Motor und einen Dynamo eine Maschine an**

**Abb. 16 (unten): Zur Definition des physikalischen Strombegriffs**



## 6 Der Strom physikalischer Größen

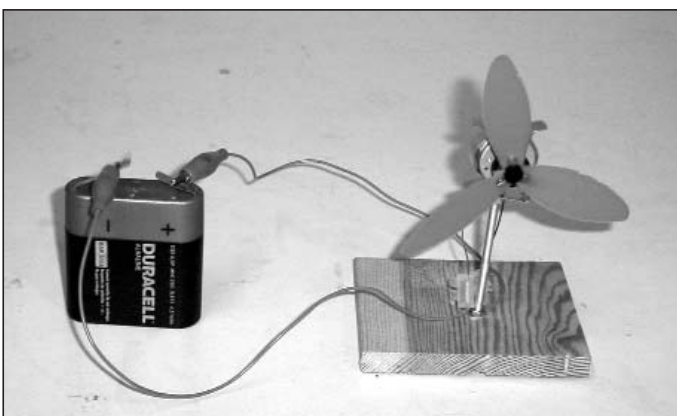
In den vergangenen Jahrhunderten haben sich die physikalischen Beschreibungsweisen immer mehr von materiellen Vorstellungen weg zu mathematischen Modellen hin entwickelt. Statt Stoffvorstellungen wurden geeignete physikalische Größen gebildet, deren Zusammenhang untersucht und mathematisch beschrieben werden kann. Diese Zusammenhänge können mit geeignet aufgebauten inneren Bildern [7] mindestens genau so wirklichkeitsgesättigt erlebt werden wie mit den im 19. Jahrhundert entwickelten „Teilchenbildern“. Am Beispiel des Energiestroms wollen wir zeigen, wie dies bei dem Strom einer physikalischen Größen möglich ist.

Abb. 15 zeigt das Modell eines „Dampfkraftwerkes“: Ein „Hammerwerk“, das für eine Fabrik steht, soll angetrieben werden. In unserem Versuchsaufbau [5] wird es von einem Motor, der Motor von einem Dynamo, der Dynamo von einer Dampfmaschine und die Dampfmaschine von einem Gasbrenner angetrieben.

Drehen wir den Gashahn stärker auf, so dreht sich das Hammerwerk schneller. Das Hammerwerk braucht „Etwas“, was es antreibt. Dieses „Etwas“ bekommt das Hammerwerk vom Dynamo, dieser vom Motor, dieser von der Dampfmaschine, diese vom Gasbrenner und dieser von der Gasflasche. Wird das Hammerwerk abgebremst, so verlangsamt sich auch die Bewegung der Dampfmaschine. Um die ursprüngliche Drehgeschwindigkeit wieder zu erhalten, muss der Gasbrenner stärker aufgedreht werden; das abgebremste Hammerwerk braucht mehr von dem „Etwas“, der Gasbrenner muss stärker aufgedreht werden, damit er mehr von dem „Etwas“ liefern kann.

**Abb. 17 (oben):** Dieser Lüfter soll angetrieben werden ...

**Abb. 18 (unten):** ... mit einer Batterie



Dieses „Etwas“, das hier strömt, ist kein Stoff im materiellen Sinne. Das, was hier fließt nannte man früher „Kraft“, was heute noch an „Kraftwerk“ und „Kraftfahrzeug“ zu erkennen ist. Dieses „Etwas“ wird heute „Energie“ genannt. Die Erfahrungen bei der vergeblichen Suche nach einem Perpetuum Mobile haben gezeigt, dass Energie nicht aus dem Nichts erschaffen werden oder sich nicht in Nichts auflösen kann, sondern dass die Energie immer irgendwo herkommt und immer irgendwo hingeht.

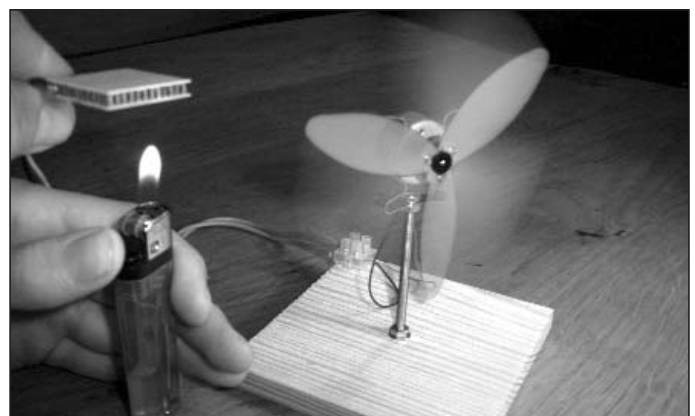
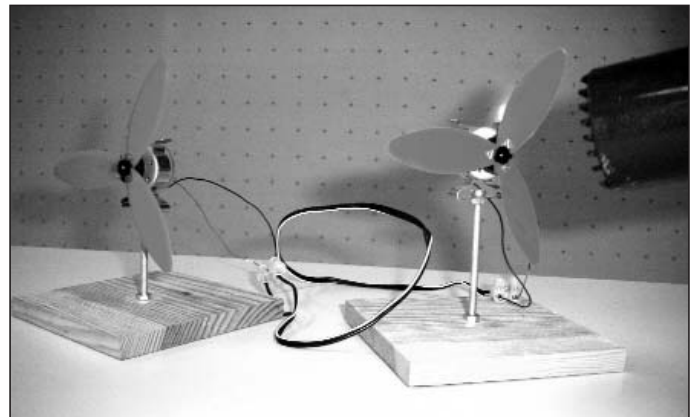
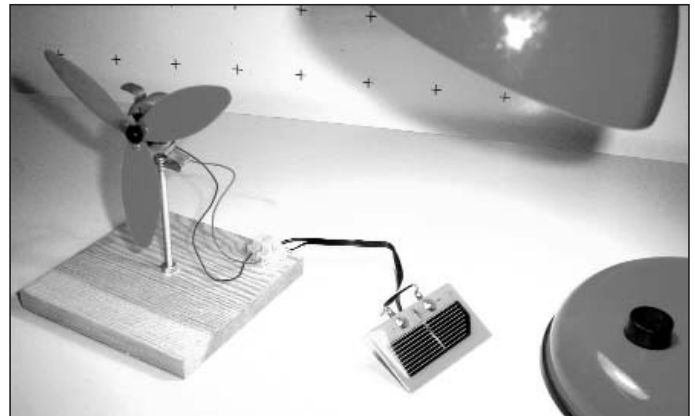
Der auf diese Weise eingeführte Energiebegriff behandelt die physikalische Größe Energie wie etwas, was strömen kann. Es gilt dann die folgende Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = I_E = P.$$

**Abb. 19 (oben):** ... mit dem Licht einer Lampe

**Abb. 20 (Mitte):** ... mit dem Wind eines Föhns

**Abb. 21 (unten):** ... mit der Wärme eines Feuerzeugs



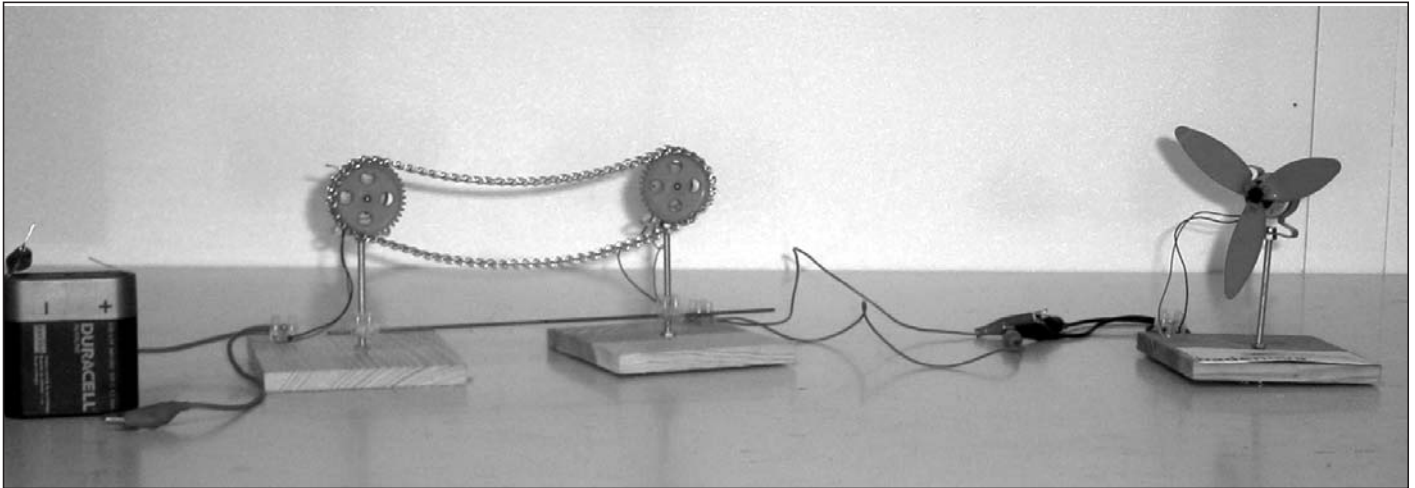
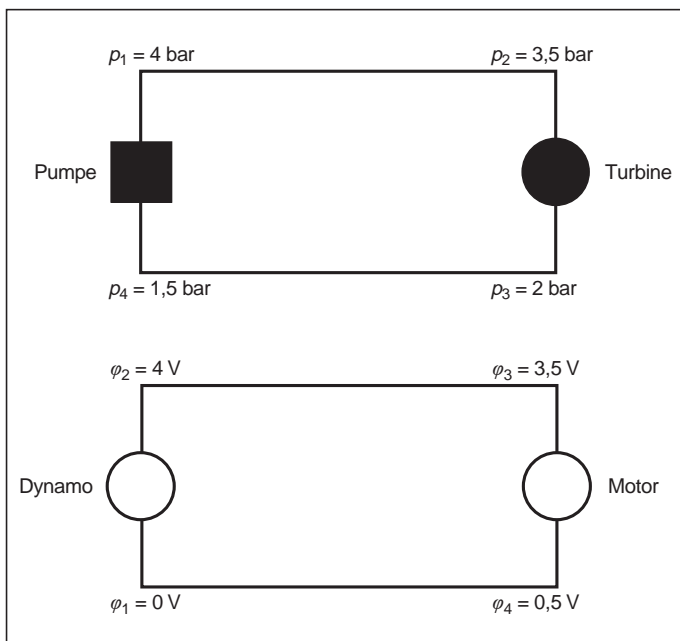
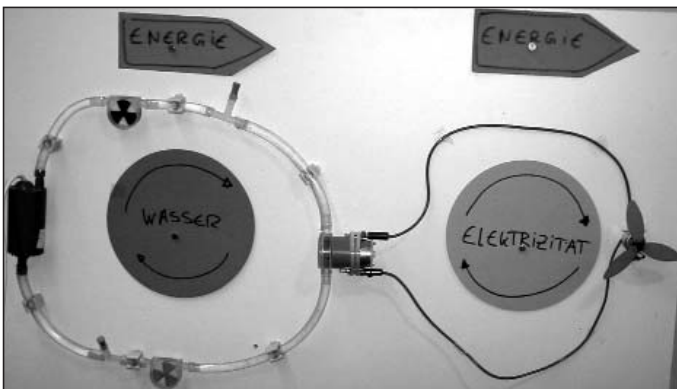


Abb. 22: Eine Kette von Energiewandlern

Der Quotient  $\Delta E/\Delta t = I_E$  hat die Maßeinheit 1 J/s, die durch 1 W abgekürzt wird. Die unanschauliche physikalische Größe Leistung  $P$  bekommt hiermit die anschauliche Bedeutung einer Energiestromstärke. Alle physikalischen Größen, für die wie für die Energie eine Raumdichte gebildet werden kann, können ebenso strömen. Beispiele hierfür sind die elektrische Ladung  $Q$ , die

Abb. 23 (oben): Energieträger-Stromkreis

Abb. 24 (unten): Analogie der Stromkreise von Wasser und Elektrizität



Entropie  $S$ , der Impuls  $p$ , der Drehimpuls  $L$  und die Stoffmenge  $n$ . Mithilfe dieses Strombegriffs wird es möglich, weit reichende Verbindungen und Analogien zwischen den einzelnen Gebieten der Physik zu finden. Dadurch wird kumulatives Lernen möglich: dieselben Strukturen können in den verschiedenen Anwendungsgebieten erkannt und angewendet werden.

Wir erhalten so den folgenden „physikalischen Strombegriff“: Nimmt in einem System der Wert einer physikalischen Größe  $X$ , für die wir zunächst eine Erhaltung annehmen, in einer Zeiteinheit  $\Delta t$  um  $\Delta X$  zu, so sagen wir, in das System ist ein Strom der Stärke  $I_X$  hinein geströmt und es gilt die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = I_X.$$

Dieser Strömungsbegriff kann auch auf physikalische Größen ohne Erhaltungseigenschaft ausgedehnt werden. In die Kontinuitätsgleichung muss nur noch ein Term für die Produktionsrate eingefügt werden.

Mit dem Bausatz „Energiewerke“, der in der Zusammenarbeit mit meinen Referendarinnen und Referendaren entstanden ist [8] kann der Energiebegriff handlungsorientiert eingeführt werden. Der preiswerte Bausatz besteht aus einem Lüfter, einer Leuchtdiode, einer monokristallinen Solarzelle und einem Thermoelement.

„Ein Lüfter soll angetrieben werden. Das kann auf unterschiedliche Weise geschehen: Zum Betrieb braucht der Lüfter „Etwas“... . Mit den „Energiewerken“ können ganze Ketten gebildet werden. Die Energie strömt immer von einer Station zur nächsten. Was sich unterwegs ändert ist nur die Art, wie der Energietransport stattfindet: durch ein Kabel, durch eine sich bewegende Kette, durch eine rotierende Welle, ...“

### 7 Das „Energie-Träger-Konzept“

Ein Problem im Zusammenhang mit der physikalischen Größe Energie ist, dass sie nie allein sondern immer mit einer zweiten physikalischen Größen zusammen ausgetauscht wird bzw. zusammen strömt. Das führt dazu, dass diese zwei Größen sehr schwer zu differenzieren sind. In der Geschichte der Physik dauerte es lange, bis etwa Ener-

## Das Energie-Träger-Konzept

Es strömt Energie von der Pumpe zur Turbine.

Das Wasser ist der Energieträger.

Die Pumpe belädt das Wasser mit Energie.

Die Turbine lädt Energie vom Wasser ab.

Die Druckdifferenz  $\Delta p$  gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. vom Wasser abgeladen wird.

Die Energiestromgleichung  $I_E = \Delta p I_W$  gibt die Stärke des Energiestroms an, der in einem Umlader mit einem Wasserstrom verbunden bzw. von einem Wasserstrom getrennt wird.

Es strömt Energie vom Dynamo zum Motor.

Die Elektrizität ist der Energieträger

Der Dynamo belädt die Elektrizität mit Energie

Der Motor lädt Energie von der Elektrizität ab.

Die Differenz des el. Potentials  $\Delta\varphi = U$  (el. Spannung) gibt an, wie viel Energie in einem Umlader auf bzw. von der Elektrizität abgeladen wird.

Die Energiestromgleichung  $I_E = U I_Q$  gibt die Stärke des Energiestroms an, der in einem Umlader mit einem elektrischen Strom verbunden bzw. von einem elektrischen Strom getrennt wird.

### Kasten 1

## Das Strom-Antrieb-Konzept

Es werden zwei Leitungen benötigt, damit das Wasser hin und zurück fließen kann.  
(„Wasserstromkreis“)

Die Wasserstromstärke  $I_W = \text{Menge} / \text{Zeit}$  ist im unverzweigten Stromkreises an jeder Stelle gleich.

Die Druckdifferenz  $\Delta p$  gibt an, wie stark der Wasserstrom angetrieben wird.

Die Antrieb-Strom-Gleichung  $\Delta p = R I_W$  gibt an, wie groß die Druckdifferenz  $\Delta p$  bei dem Strömungswiderstand  $R$  sein muss, um einen Wasserstrom der Stärke  $I_W$  zu erhalten.

Es werden zwei Leitungen benötigt, damit die Elektrizität hin und zurück fließen kann.  
(„elektr. Stromkreis“)

Die el. Stromstärke  $I_Q = \text{Elektrizitätsmenge} / \text{Zeit}$  ist im unverzweigten Stromkreises an jeder Stelle gleich.

Die Differenz des el. Potentials  $\Delta\varphi = U$  (el. Spannung) gibt an, wie stark der el. Strom angetrieben wird.

Die Antrieb-Strom-Gleichung  $U = R I_Q$  gibt an, wie groß die elektrische Spannung  $U$  bei dem elektrischen Widerstand  $R$  sein muss, um einen el. Strom der Stärke  $I_Q$  zu erhalten.

### Kasten 2

gie und Impuls, Energie und Entropie klar unterschieden werden konnten. Im Alltag werden die entsprechenden Begriffe in der Regel nicht voneinander getrennt: „In einer Glühlampe wird Strom in Licht umgewandelt.“ „Licht ist Energie!“ Im Unterricht kann die Differenzierung der Begriffe mit dem „Energie-Träger-Bild“ erfolgen: Betrachten wir den in Abb. 15 beschriebenen Versuch noch einmal, so stellen wir einerseits fest, dass die Energie von der Dampfmaschine bis zum Hammerwerk hindurch strömt, dass sie aber unterwegs von unterschiedlichen „Energieträgern“ transportiert wird, von Propangas-Sauerstoff, von Dampf, von Treibriemen, von Elektrizität; ... Energie kann nie alleine strömen, sie benötigt immer einen Träger.

In Gasbrenner, Dampfmaschine, Dynamo, Motor und Hammerwerk wechselt die Energie ihren Träger. Diese Geräte bekommen die Bedeutung von Energie-Umladestationen. Wir nennen sie kurz „Energieumlader“. Durch diese und ähnliche Überlegungen, können die Begriffe „Energie“ und „Energieträger“ gebildet und gegeneinander abgegrenzt werden. Die Energieträger strömen zusammen mit der Energie, sie sind die extensiven Größen, die

aufgrund der Gibbs'schen Fundamentalform, jede Energieänderung eines Systems begleiten:

$$dE = TdS + \varphi dQ + v dp + \mu dn + \dots,$$

wobei  $T$  die Temperatur,  $\varphi$  das elektrische Potential,  $v$  die Geschwindigkeit und  $\mu$  das chemische Potential sind.

Auf die Bedeutung und Erklärung dieser Gleichung soll hier nicht näher eingegangen werden. Stattdessen sei auf die Lehrbücher der Thermodynamik verwiesen.

Um im Unterricht den Unterschied der Begriffe Energie und Träger eindrucksvoll demonstrieren zu können, wurde der in Abb. 23 dargestellte „Energieträger-Stromkreis“ entwickelt [9]: Die Drehung des Propellers zeigt an, dass dort Energie ankommt. Diese wird mithilfe von Wasser und Elektrizität von der Pumpe dorthin transportiert. Das Wasser jedoch nimmt einen anderen Weg als die Energie: es strömt im Kreis. In der Pumpe wird es von neuem immer wieder mit Energie beladen. In der Turbine gibt das Wasser die Energie immer wieder ab. Dasselbe gilt für die Elektrizität. Darauf werden wir an späterer Stelle zurückkommen.



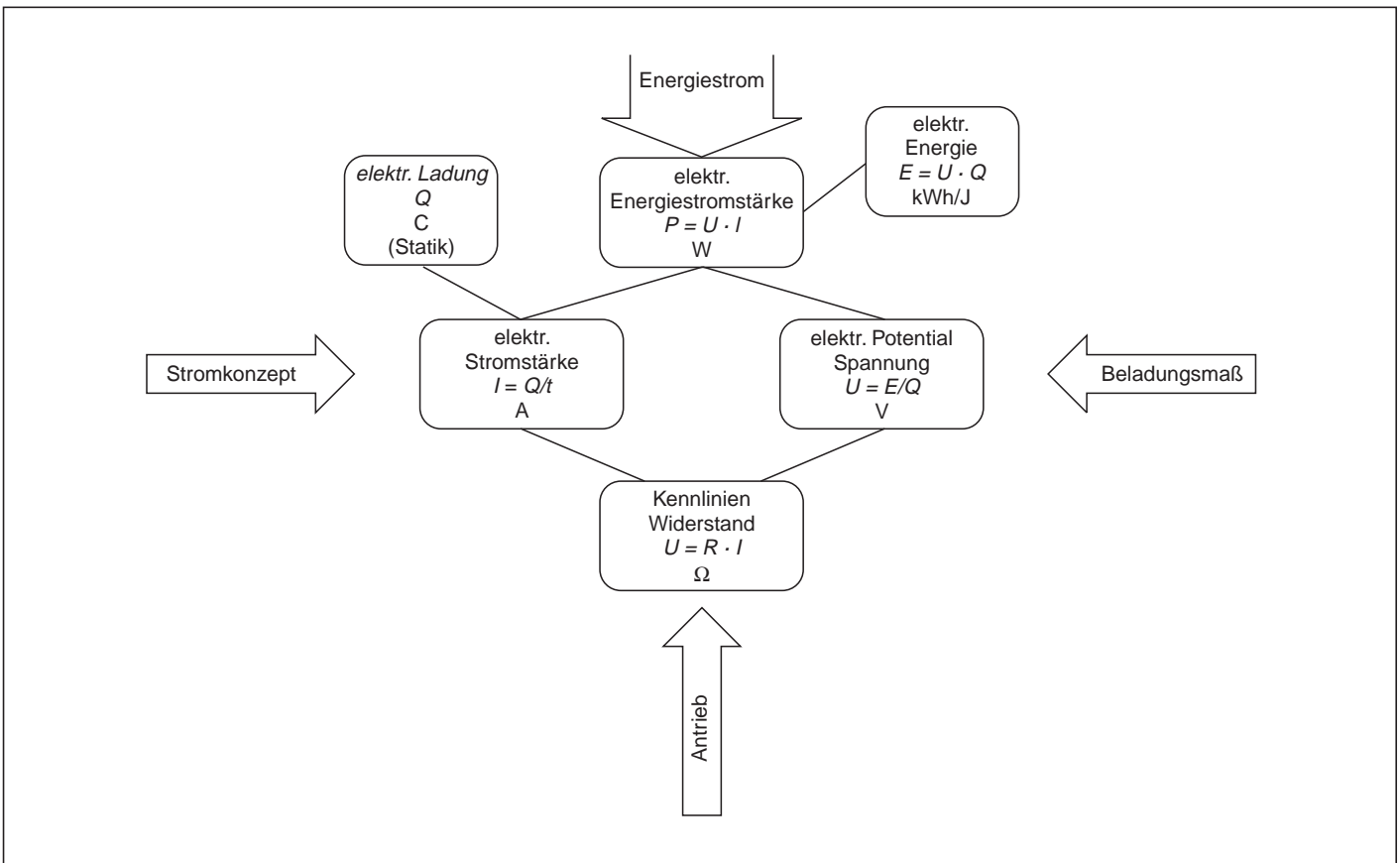


Abb. 25: Das Begriffsnetz der Elektrizitätslehre mit den Verständniskonzepten

## 8 Die Elektrizitätslehre im Anfängerunterricht

Um das Geflecht der in Abb. 2 dargestellten Beziehungen in einem Anfängerunterricht schrittweise aufzubauen und gleichzeitig die entsprechenden Begriffe zu differenzieren, ist es sinnvoll, in einer Anfangsphase die folgenden Phänomene, Begriffe und Konzepte einzuführen.

### 8.1 Handlungsorientierte Erfahrungen mit einfachen elektrischen Stromkreisen

Bis zum Ende der 6. Klasse können die Schülerinnen und Schüler in Schülerversuchen die folgenden Phänomene kennen lernen, die dann später die Grundlage für eine begriffliche Durchdringung bilden:

1. Es werden immer *zwei Verbindungen* zwischen Batterie, Solarzelle, ... einerseits und Lampe, Motor, Klingel, ... andererseits benötigt.
2. Die Verbindungen dürfen an *keiner Stelle unterbrochen* sein.
3. Ein Schalter ist eine „*behebbar Unterbrechungsstelle*“.
4. Eisen, Kupfer, Aluminium, Silber, Gold, Bronze, Messing, Nickel, (Metalle), Graphit, Salzwasser, ... können als Verbindung dienen, Holz, Papier, Leder, Glas, ... dagegen nicht.
5. Dynamo und Lampe sind beim Fahrrad auch durch *zwei Leitungen* miteinander verbunden: das Kabel ist die eine, der metallene Rahmen die andere. Hierbei werden die Begriffe „elektrischer Stromkreis“ und „Leitung“ zunächst propädeutisch verwendet.

### 8.2 Einführung des Energiebegriffs

Der Energiebegriff und des „Energie-Träger-Konzepts“ kann wie in Abschnitt 6 beschrieben eingeführt werden. Die

Maßeinheit der Energie kann im Zusammenhang mit der Ernährung des Menschen hinzu kommen. Ein Mensch braucht am Tag etwa 10.000 kJ. Der Speiseplan jeder Schülerin und jedes Schülers weisen große individuelle Unterschiede auf. Beim Verdauen, nimmt der Mensch die Energie der Nahrungsmittel auf; die Nahrungsmittel selbst sind nicht die Energie: Schokolade enthält viel Energie; Schokolade ist aber nicht die Energie selbst, sondern ein Energieträger.

Wichtig ist hier, dass der Weg der Energie möglichst oft über mehrere Stationen hin verfolgt wird: „Die Energie, die beim Radfahren von der Kette zum Hinderrad gelangt, hat der Muskel mithilfe des Blutes und der Verdauung von den Lebensmitteln bekommen.“

Dass unterwegs ein Großteil der Energie einen anderen Weg nimmt, muss an dieser Stelle nicht problematisiert werden und spielt für die Schülerinnen und Schülern hier auch noch keine wichtige Rolle. Diese Fragestellung kann dann an späterer Stelle des Unterrichts zu den Begriffen „Wirkungsgrad“ und „Energiedienstleistung“ führen.

### 8.3 Einführung des Stromkonzepts

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, kann der Begriff „Stromstärke“ eingeführt und auf verschiedene Ströme angewendet werden. Wie Wasser strömt die Energie von einer Stelle zu einer anderen. An dieser Stelle kann auch der Begriff „Energierstromstärke“ eingeführt werden, da die Wattzahl der unterschiedlichen Geräte im Alltag eine wichtige Rolle spielt.

### 8.4 Der elektrische Stromkreis

Der in Abb. 23 abgebildete „Energieträger-Stromkreis“ kann dann zu der Bildung des Begriffs „elektrischer Strom“ führen. Dabei kann darauf hingewiesen werden, dass die

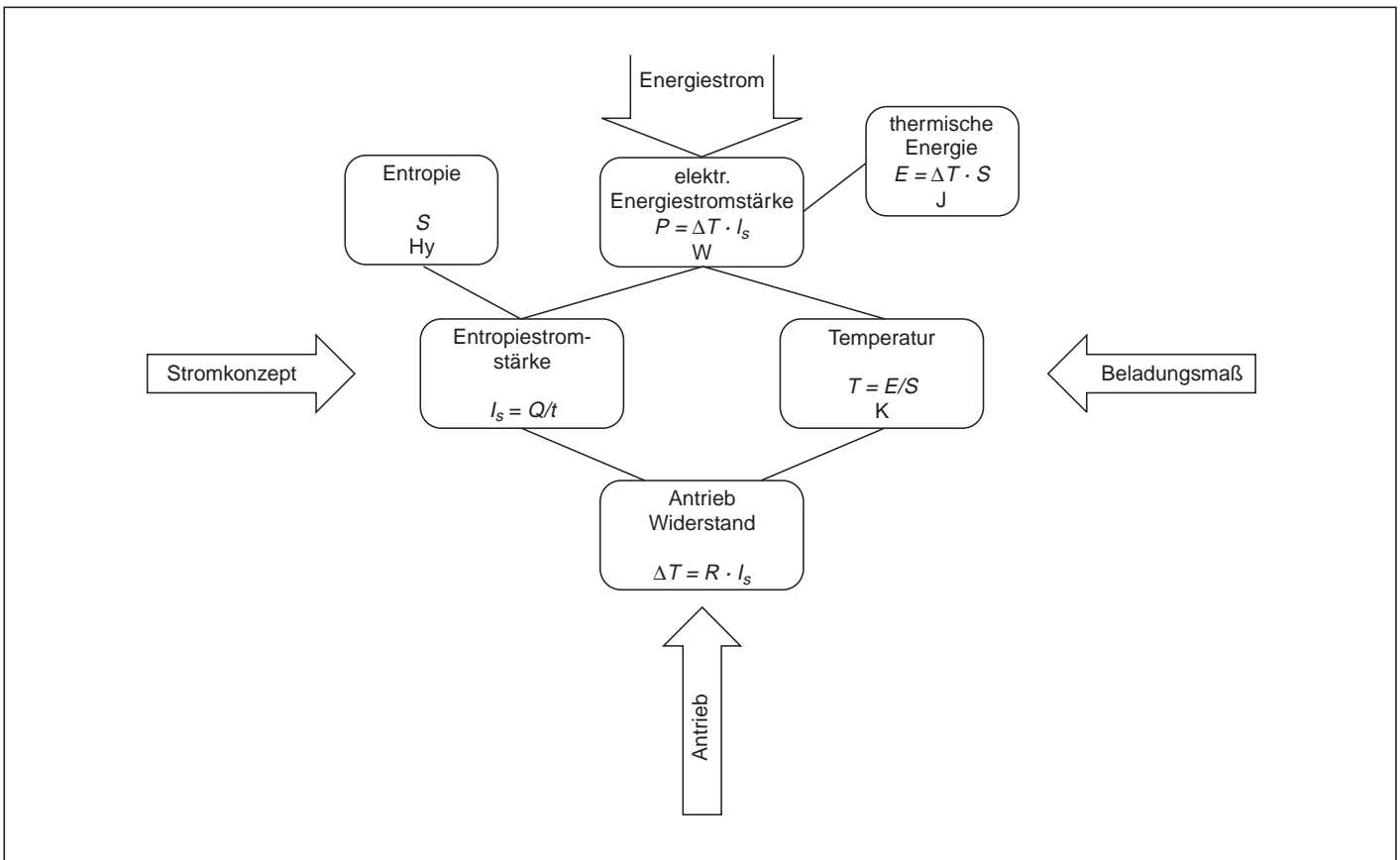


Abb. 26: Das Begriffsnetz der Entropielehre mit den Verständniskonzepten

Strukturgleichheit zwischen den Flüssigkeitsströmungen und den elektrischen Phänomenen zu der Vorstellung „elektrischer Strom“ geführt haben.

### 8.5 Die Analogie von Wasserstrom und elektrischem Strom

Durch konsequentes Vergleichen der hydraulischen und elektrischen Erscheinungen kann die tabellarisch dargestellte Analogie schrittweise, eventuell auf verschiedene Schuljahre verteilt, im Unterricht entwickelt werden. In dieser Tabelle wird die physikalische Größe „elektrische Ladung“ „Elektrizität“ genannt.

Die so aufgebaute Analogie erweist sich auch im Physikunterricht der höheren Klassen als tragfähig. Dort kann dann auch darauf eingegangen werden, dass elektrizitätsgetragene Energie nicht durch das Kabel selbst, sondern mithilfe elektromagnetischer Felder in dem Raum um das Kabel herum strömt.

## 9 Schlussbemerkungen

In Abb. 25 ist das Begriffsnetz dargestellt, das sich die Schülerinnen und Schüler im Laufe des Unterrichts aufbauen können. Das ausführliche Behandeln der eingeführten Konzepte erscheint zwar zunächst recht zeitaufwendig, stellt sich aber im Ganzen gesehen als zeitökonomisch heraus, da die Schülerinnen und Schüler stabile Konzepte entwickeln, auf die immer wieder von neuem aufgebaut werden kann. Bei analogen Betrachtungen in anderen Gebieten der Physik erleben die Schülerinnen und Schüler, dass auch dort dieselben Konzepte von zentraler Bedeutung sind. In Abb. 26 ist exemplarisch das entsprechende Begriffsnetz der Wärme-

lehre abgebildet. Die Begriffsnetze stabilisieren sich gegenseitig. Im Unterricht zeigt sich, dass es den Schülerinnen und Schülern nach erstaunlich kurzer Zeit gelingt mit diesen Konzepten auch neue Phänomenbereiche selbständig begrifflich zu fassen. Diese strukturgleiche Beschreibung der verschiedenen Gebiete der Physik wird dadurch ermöglicht, dass die „fluidale Wurzel“ des alltagssprachlichen Strömungsbegriffs schrittweise zu dem physikalischen Begriff „Strom einer physikalischen Größe“ hin entwickelt wurde ohne dabei auf die innerliche Anschaulichkeit einer „Strömung“ zu verzichten.

### Literatur und Bezugsquellen:

- [1] Technik für dich: elektromagnetische Geräte, Cornelsen Verlag
- [2] Spektrum Physik Gymnasien 8 Baden-Württemberg, Schroedel, 2000
- [3] Eine Bauanleitung dieser Gefäße ist zu finden unter [www.plappertfreiburg.de/physik](http://www.plappertfreiburg.de/physik)
- [4] Plappert, D.: Die Strukturgleichheit verschiedener physikalischer Gebiete gezeigt am Beispiel Hydraulik-Elektrizitätslehre, Schroedel Verlag, Hannover, 1979. Dieser Artikel ist zu finden unter [www.plappertfreiburg.de/physik](http://www.plappertfreiburg.de/physik)
- [5] Schneider Laborplan, 79219 Staufen, Krozinger Straße 18, Tel. 07633 / 8141, Fax 07633 / 50825
- [6] Um den Gravitationsdruck des Wassers auszuschließen, können alle Experimente mit einem liegenden Modellstromkreis durchgeführt werden. Die geöffneten Manometerschläuche werden dann mithilfe von Stativmaterial gehalten.
- [7] Euler, M.: Einsicht in die Metamorphosen innerer Bilder, Praxis der Naturwissenschaften-Physik 4/49 (2000) 10
- [8] Versuchsanleitung und Lieferbedingungen unter [www.plappertfreiburg.de/physik](http://www.plappertfreiburg.de/physik) Bestelladresse: PPA, Littenweilerstr. 25a, 79117 Freiburg
- [9] Conatex-Didactic, Rombachstrasse 65, 66539 Neunkirchen, 06821-9411-0.

### Anschrift des Verfassers:

Dieter Plappert, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung, Kunzenweg 21, 79117 Freiburg