

**Strom kommt an!**

**Das „Strom-Antrieb-  
Widerstands-Konzept“  
in den Bildungsstandards**

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Vorwort .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1. Das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ im Physikunterricht.....</b>                              | <b>5</b>  |
| 1.1. Einleitung.....  | 5         |
| 1.2. Zusammenhang mit den Bildungsstandards .....   | 5         |
| 1.3. Das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ als physikalisches Modell.....                             | 6         |
| <b>2. Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept bei Flüssigkeiten und Gasen.....</b>                        | <b>8</b>  |
| 2.1. Was strömt? .....  | 8         |
| 2.2. Wann strömt die Luft (das Wasser)? – Der Antrieb von Strömungen.....                               | 9         |
| 2.3. Die Stromstärke .....  | 10        |
| 2.4. Der Stromkreis .....   | 13        |
| 2.5. Abschließende Bemerkungen .....  | 13        |
| <b>3. Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept in der Mechanik, Elektrizitätslehre und Wärmelehre.....</b> | <b>14</b> |
| 3.1. Was strömt? .....  | 14        |
| 3.1.1. Begriffsbildung.....   | 14        |
| 3.1.2. Einstieg in die Begriffsbildung: .....   | 15        |
| 3.1.3. Wo ist mehr enthalten?.....  | 16        |
| 3.1.4. Grundwortschatz und Stützwerte: .....  | 17        |
| 3.1.5. Was passiert mit dem Impuls beim Crash? .....  | 18        |
| 3.1.6. Der Impuls kann auch negative Werte haben .....  | 19        |
| 3.1.7. Wie wird der Impuls gemessen?.....   | 19        |
| 3.2. Ströme brauchen einen Antrieb .....  | 20        |
| 3.2.1. Nicht nur Luft strömt.....   | 20        |
| 3.2.2. Erden .....  | 22        |
| 3.2.3. Kann Elektrizität auch von Stellen tiefen Potentials zu Stellen hohen Potentials fließen? .....  | 23        |
| 3.2.4. Leiter und Isolatoren .....  | 24        |
| 3.3. Die Stromstärke .....  | 25        |
| 3.3.1. Was ist eine Stromstärke? .....  | 25        |
| 3.3.2. Wie werden Stromstärken gemessen? .....  | 26        |
| 3.3.3. Wovon die Stromstärke abhängt .....  | 26        |
| 3.3.4. Grundwortschatz .....  | 28        |
| 3.4. Der Stromkreis .....   | 28        |
| 3.4.1. Serienschaltung mit zwei Lämpchen.....   | 28        |
| 3.4.2. Parallelschaltung .....  | 29        |
| 3.4.3. Analogie Wasserstromkreis.....   | 29        |
| 3.4.4. Mechanische Stromkreise.....   | 30        |
| 3.4.5. Stromkreise in der Wärmelehre? .....   | 31        |
| 3.5. Transporte .....   | 31        |
| 3.5.1. Wärmeleitung und Konvektion .....  | 31        |
| 3.5.2. Gibt es dazu Analogien in den anderen Teilgebieten? .....  | 31        |
| 3.6. Gleichgewichte .....   | 32        |
| 3.6.1. Gleichgewichte in den Bildungsstandards.....   | 32        |
| 3.6.2. Sobald der Antrieb verschwindet, befindet sich die Anordnung im Gleichgewicht.....               | 33        |
| 3.6.3. Fließgleichgewichte .....  | 33        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. Das Konzept im Unterrichtseinsatz – Ein Unterrichtsvorschlag zum Einstieg in die Elektrizitätslehre .....</b> | <b>35</b> |
| 4.1. Einstieg: Die elektrische Ladung .....   | 35        |
| 4.2. Wie viel Elektrizität befindet sich auf einem Körper? .....  | 37        |
| 4.3. Elektrizität kann strömen .....  | 38        |
| 4.4. Der elektrische Stromkreis .....   | 39        |
| 4.5. Die elektrische Stromstärke .....  | 41        |
| 4.6. Die Messung der elektrischen Stromstärke .....   | 42        |
| 4.7. Elektrotechnische Probleme .....   | 45        |
| <b>5. Konzepte im Unterrichtseinsatz – Zwei weitere Unterrichtsbeispiele zum Strom-Antriebs-Konzept .....</b>       | <b>46</b> |
| 5.1. Beispiel aus Klasse 8 – Mechanik .....   | 46        |
| 5.2. Beispiel aus Klasse 10 – Wiederholung und Ausblick Rotationsmechanik .....                                     | 50        |
| 5.2.1. Teil 1: Die Wiederholung .....   | 50        |
| 5.2.2. Teil 2: Die Rotationsmechanik .....  | 53        |
| <b>6. Anwendungen und Aufgaben .....</b>  | <b>55</b> |
| 6.1. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen .....   | 55        |
| 6.2. Elektrizitätslehre .....   | 60        |
| 6.3. Mechanik .....   | 67        |
| 6.4. Wärmelehre .....   | 76        |
| <b>7. Physikalische Grundlagen des „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzepts“ .....</b>                                   | <b>86</b> |
| 7.1. Mengenartige Größen: Grundlage des „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ .....                                   | 86        |
| 7.2. Das „Strom-Antriebs-Konzept“ .....   | 88        |
| 7.3. Fazit .....  | 89        |

## Vorwort

Die vorliegende Handreichung stellt mit dem „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ eine Modellvorstellung für physikalische Vorgänge vor, das in weiten Teilen des Physikunterrichts tragfähig ist, und daher für einen vernetzten und strukturierten Unterricht im Sinne der Bildungsstandards ausgezeichnet geeignet ist.

Nach einer kurzen Einleitung in Kapitel 1 werden im zweiten Kapitel zunächst die Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen behandelt. Aus Beobachtungen und Untersuchungen dieser den Schülerinnen und Schülern durch viele Alltagserfahrungen vertrauten Vorgänge kann man allgemeine Regeln zur Beschreibung und Vorhersage von Strömungserscheinungen ableiten: Ein Wasser- oder Luftstrom durch eine Leitung (z. B. einen Schlauch) ist stets mit einem Druckunterschied zwischen Anfang und Ende der Leitung verbunden. Diesen Druckunterschied kann man als „Antrieb“ und damit als Ursache des Stroms interpretieren. Der Antrieb wird benötigt um den „Widerstand“, den jede Leitung dem Strom entgegensetzt, zu überwinden. Dies ist die Grundlage des „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzepts“.

Im dritten Kapitel wird gezeigt, wie man dieses Konzept im Unterricht auf die Mechanik, Elektrizitäts- und Wärmelehre übertragen kann. Dabei hat man es nicht mehr mit unseren Sinnen direkt zugänglichen Wasser- und Luftströmen zu tun, sondern mit abstrakten Strömen der mengenartigen Größen Impuls, elektrische Ladung und Entropie.

Kapitel 4 enthält einen ausführlichen Unterrichtsvorschlag für den Einstieg in die Elektrizitätslehre bei Betonung und Verwendung des Strom-Antrieb-Widerstands-Konzepts.

In Kapitel 5 findet man zwei weitere kürzere Unterrichtsbeispiele: zur Mechanik in Klasse 8 und zur Zusammenfassung mit Ausblick auf die Rotationsmechanik in Klasse 10.

Das sechste Kapitel enthält eine Reihe von Übungsaufgaben und Anwendungen um den Unterricht abwechslungsreich und alltagsbezogen zu gestalten.

Wer genaueres zu den fachwissenschaftlichen Begründungen des Unterrichtskonzepts wissen möchte, findet dazu einige Anmerkungen in Kapitel 7.

Die Autoren, Wörth am Rhein im Juli 2007

# 1. Das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ im Physikunterricht

## 1.1. Einleitung

In unserer modernen Wissensgesellschaft ist die Forderung nach lebenslangem Lernen allgegenwärtig. Von der Schule wird zu Recht verlangt, zukünftige Generationen auf diese Herausforderung vorzubereiten. Es ist schon lange nicht mehr damit getan, Schülerköpfe mit Fakten und Daten zu füllen. Den Schülerinnen und Schülern müssen vielmehr tragfähige Konzepte und Ideen vermittelt werden, die es ihnen ermöglichen, ihr Wissen selbständig aufzubauen und zu erweitern.

In der KMK-Vereinbarung über Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss vom 04.12.2003 ist dazu formuliert: „Die Bildungsstandards zielen auf systematisches und vernetztes Lernen und folgen so dem Prinzip des kumulativen Kompetenzerwerbs.“

Wie kann dies in den Naturwissenschaften und speziell im Physikunterricht erreicht werden?

Die traditionellen Teilgebiete der Physik wie Mechanik, Elektrizitätslehre, Wärmelehre, Optik, Atomphysik,... sollten nicht unverbunden nebeneinander stehen, sondern es sollten Strukturen und Analogien innerhalb der Physik ausgenutzt werden. Oft sind Konzepte, die in einem Teilgebiet der Physik angewendet werden können, auch auf andere Teilgebiete oder sogar andere Disziplinen erfolgreich übertragbar.

Ein solches Konzept, das für viele Bereiche tragfähige Anschauungen liefert, ist das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“. Es beruht darauf, dass Vorgänge durch die Bilanzierung von mengenartigen Größen beschrieben werden können, z. B. die Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen, elektrische Ströme, mechanische und thermische Vorgänge, oder sogar chemische Reaktionen.

Neben der Tatsache, dass eine Vielzahl verschiedener Vorgänge auf die gleiche Art beschrieben und der Unterricht dadurch effektiver wird, bietet das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ aber noch weitere didaktische Vorteile:

- Es ist leicht möglich, an Präkonzepte und Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler anzuknüpfen.
- Aufbauend auf der Analogie ist es möglich, auf anschauliche Art physikalische Größen einzuführen.
- Bei vielen physikalischen Größen, müssen die Schülerinnen und Schüler außer Definition, Messvorschrift und Zusammenhang mit anderen Größen auch noch lernen, wie sie sprachlich mit der Größe umgehen müssen. Viele unserer physikalischen Größen gestatten nämlich nur die Verwendung ganz bestimmter Präpositionen oder Verben. So wird Arbeit etwa verrichtet oder geleistet, eine Kraft wird ausgeübt oder wirkt, und eine Spannung herrscht oder liegt an. Bei mengenartigen Größen gibt es solche Einschränkungen nicht. Man darf genauso über sie reden, wie man umgangssprachlich über Stoffe oder Materialien spricht.

## 1.2. Zusammenhang mit den Bildungsstandards

In den KMK-Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss vom 16.12.2004 wird der Kompetenzbereich Fachwissen inhaltlich durch vier Basiskonzepte abgedeckt: „[Die Basiskonzepte] begünstigen kumulatives, kontextbezogenes Lernen. Sie systematisieren und strukturieren Inhalte so, dass der Erwerb eines grundlegenden, vernetzten Wissens erleichtert wird. Die inhaltliche Dimension umfasst übergreifende, inhaltlich begründete Prinzipien und Erkenntnis leitende Ideen, mit denen Phänomene physikalisch beschrieben und geordnet werden.“

Das „Strom-Antriebs-Widerstands-Konzept“ ist dabei im 3. Basiskonzept der Bildungsstandards angelegt, dem Basiskonzept „System“<sup>1</sup>:

| <i>3. System</i>  | <i>Beispiele</i>   |
|---|--|
| – Stabile Zustände sind Systeme im Gleichgewicht.   | Kräftegleichgewicht, Druckgleichgewicht, thermisches Gleichgewicht             |
| – Gestörte Gleichgewichte können Ströme und Schwingungen hervorrufen.                                       | Druck-, Temperatur- bzw. Potenzialunterschiede und die verursachten Strömungen |
| – Ströme benötigen einen Antrieb (Ursache) und können durch Widerstände in ihrer Stärke beeinflusst werden. | Elektrischer Stromkreis, thermische Ströme                                     |

Einige der in den Bildungsstandards für die verschiedenen Kompetenzbereiche genannten Standards sind gut mit dem „Strom-Antriebs-Widerstands-Konzept vereinbar:

„Die Schülerinnen und Schüler ...

... verfügen über strukturiertes Basiswissen auf Grundlage der Basiskonzepte. (Fachwissen 1)

... wenden diese Kenntnisse in verschiedenen Kontexten an. (Fachwissen 4)

... ziehen Analogien zum Lösen von Aufgaben und Problemen heran. (Fachwissen 5)

... beschreiben Phänomene und führen sie auf bekannte physikalische Zusammenhänge zurück. (Erkenntnisgewinnung 1)

... verwenden Analogien und Modellvorstellungen zur Wissensgenerierung. (Erkenntnisgewinnung 3)

... tauschen sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen unter angemessener Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen aus. (Kommunikation 1)“

### 1.3. Das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ als physikalisches Modell

Modelle spielen eine wichtige Rolle im Physikunterricht. Sie ermöglichen es, dass wir uns eine Anschauung bzw. ein mentales Bild physikalischer Vorgänge machen, indem wir bekannte Strukturen auf die physikalischen Vorgänge übertragen.

Jedes Modell setzt voraus, dass ein System A in einer Beziehung zu einem weiteren System B steht, d. h. zwischen den Systemen gibt es eine Art „Abbildungsvorschrift“, so dass Zusammenhänge, Regeln und Operationen im System A auf das andere System B übertragen werden können. Wenn die Übertragung gültiger Regeln in A häufig wieder gültige Regeln für B liefert, dann ist System A ein gutes Modell für System B. Allerdings werden nie alle Übertragungen möglich sein, denn dann müssten die Systeme A und B identisch sein. Es gibt daher auch keine „richtigen“ und „falschen“ Modelle, sondern nur mehr oder weniger zweckmäßige Modelle. Tatsächlich werden ja auch in vielen Bereichen verschiedene, scheinbar unvereinbare Modelle parallel verwendet, etwa das Strahlenmodell und das Wellenmodell des Lichts in der Optik. Je nach Problemstellung wählt man das für die Behandlung der Aufgabe zweckmäßigere Modell aus.

Auch das „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ ist ein solches Modell. Es ermöglicht in vielen Fällen, anschaulich und erfolgreich physikalische Vorgänge zu beschreiben. Aber wie jedes Modell hat es natürlich auch seine Grenzen, und man kann nicht alle Aspekte des physikalischen Systems korrekt wiedergeben, wenn man sich z. B. die physikalische Größe elektrische Ladung als ein Fluidum vorstellt, das durch die Leitungen eines elektrischen Stromkreises fließt. Daraus zu folgern, dass die Verwendung des Modells beim Physiklehren unange-

<sup>1</sup> Der Begriff „System“ ist hier vom Begriff des physikalischen Systems zu unterscheiden.

bracht ist, hieße aber das Kind mit dem Bade auszuschütten. Erfolgreiches Physiklernen funktioniert nicht trotz, sondern wegen der Verwendung von (unvollkommenen) Modellen.

## 2. Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept bei Flüssigkeiten und Gasen

Was macht eigentlich das Strom-Antrieb-Widerstandskonzept aus? Aus welchen Elementen setzt es sich zusammen? Welche Ideen sind nicht typisch für ein spezielles Teilgebiet der Physik, sondern begegnen uns bei der Reise durch die Physik immer wieder aufs Neue? Die Grundlagen des Strom-Antrieb-Widerstandskonzepts lassen sich in der Elektrizitätslehre, der Wärmelehre oder einem anderen physikalischen Teilgebiet entwickeln. Besonders anschaulich gelingt das aber am Beispiel der Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen. Wir empfehlen daher dieses Teilgebiet für den Einstieg.

### 2.1. Was strömt?

In der Elektrizitätslehre strömt die Ladung, in der Wärmelehre die Entropie, in der Mechanik der Impuls. In allen drei Teilgebieten der Physik steht am Anfang zunächst die Begriffsbildung der strömenden Größe. In dem hier zu besprechenden Teilgebiet „Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen“ ist die Aufgabe einfacher, denn wir betrachten Luft- und Wasserströme. Die sind den Schülerinnen und Schülern vertraut, eine einleitende Begriffsbildung ist nicht erforderlich.

Neben der strömenden Größe benötigen wir in jedem Teilgebiet mit Blick auf den Antrieb noch eine weitere Größe: in der Elektrizitätslehre das elektrische Potenzial, in der Wärmelehre die Temperatur, in der Mechanik die Geschwindigkeit und bei den Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen den Druck. Auch bei diesen ist je nach Vertrautheit der Schülerinnen und Schüler mit der jeweiligen Größe in unterschiedlichem Umfang eine einleitende Begriffsbildung angezeigt. Meist wird der Druck erst in Klasse 9 mit Hilfe der Formel  $p = F / A$  eingeführt. Unabhängig davon lässt sich aber bereits ab Klasse 5 in zwei Unterrichtsstunden eine für unsere Zwecke ausreichende Anschauung der Größe Druck vermitteln.

Dazu wird der Druck in vielen Beispielen gemessen und verglichen, etwa der Druck in Fahrradreifen und Autoreifen, der Druck in der Wasserleitung, der Luftdruck, etc. Mit dem Boyle-Mariotte-Gerät kann ein Wettbewerb veranstaltet werden, welche Schülerin bzw. welcher Schüler die größte Abweichung (nach oben und unten) vom Normaldruck erzeugen kann.



Abb. 1: Luftdruck im Reifen



Abb. 2: Druck in der Wasserleitung





Abb. 3: Barometer

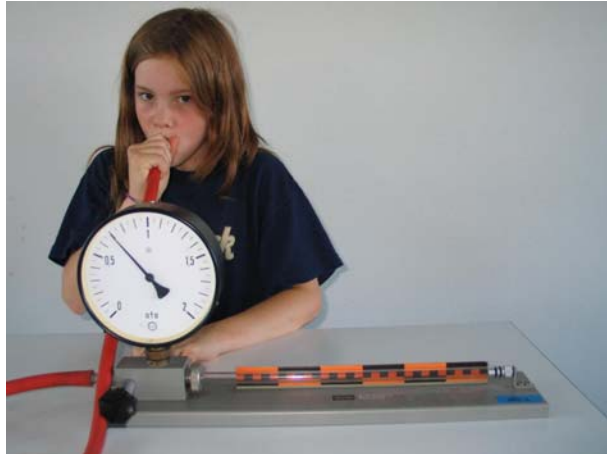


Abb. 4: Unterdruck, Überdruck

Bei den Schülerinnen und Schülern sind auch der Mohrenkopf in der Vakuumglocke und ähnliche Experimente sehr beliebt.

Wenn wir mit der Größe Druck vertraut sind, stellen wir die Frage, in welchem der beiden Reifen mehr Luft enthalten ist. Sicher doch im großen – oder vielleicht doch im kleinen!?



Abb. 5: Luftmengen in verschiedenen Reifen

Die Diskussion darüber führt auf die folgende Regel 1:

In einem Reifen ist umso mehr Luft enthalten,  
– je höher der Druck ist, der in ihm herrscht.  
– je größer der Reifen ist.

Die Regel kann durch weitere Experimente abgesichert werden:

Ein Autoreifen wird schrittweise aufgepumpt. Die Luftmenge im Reifen nimmt zu. Die Größe des Reifens ändert sich dabei nicht, wohl aber der Druck. Wenn wir hingegen einen Luftballon aufpumpen, dann ändern sich bei zunehmender Luftmenge sowohl die Größe des Luftballons als auch der Druck, der in ihm herrscht. (Was ändert sich, wenn wir einen Luftballon zum zweiten Mal aufblasen?)

## 2.2. Wann strömt die Luft (das Wasser)? – Der Antrieb von Strömungen

Strömt die Luft in Abb. 6 vom großen in den kleinen Reifen? Wovon hängt es eigentlich ab, in welche Richtung die Luft strömt? Wir machen die Probe aufs Exempel und verbinden die beiden Reifen mit einem Schlauch.



Abb. 6: Luftströme

Es zeigt sich, dass die Strömungsrichtung nicht von der Reifengröße, sondern von den Druckwerten abhängt. Und wie lange strömt die Luft? Manche Schülerinnen und Schüler vermuten: solange bis in beiden Reifen gleich viel Luft ist. Tatsächlich stellt sich aber in beiden Reifen der gleiche Druck ein, was nur im Spezialfall gleich großer Reifen auch gleiche Luftmengen zur Folge hat. Wir erhalten damit Regel 2:

Luft (Wasser) strömt stets von selbst von Stellen hohen Drucks zu Stellen tiefen Drucks.  
Die Luft hört auf zu strömen, sobald der Druckunterschied gleich null ist.  
Der Druckunterschied ist ein Antrieb für einen Luftstrom.

Man sollte im Unterricht betonen, dass die Luft strömt, und nicht der Druck.

Wir wenden die Regel auf eine spezielle Situation an. Das Ventil eines Reifens wird geöffnet. Fließt alle Luft aus dem Reifen? Die Luft strömt aus dem Reifen in die Atmosphäre, bis  $\Delta p = 0$  bar. Was haben wir gemacht? Wir haben den Reifen „pneumatisch geerdet“!

Nach der Regel strömt die Luft immer von Stellen hohen zu Stellen tiefen Drucks. Wie kommt die Luft dann aber in den Fahrradreifen? Offensichtlich nicht von selbst. Ohne Luftpumpe geht gar nichts. In der Physiksammlung finden wir noch mehr Beispiele für Pumpen: Drehschieberpumpen, Zahnradpumpen, Kreiselpumpen, ...

Regel 3 lautet:

Damit Luft oder Wasser von Stellen tiefen Drucks zu Stellen hohen Drucks strömt, benötigt man eine Pumpe.

### 2.3. Die Stromstärke



Abb. 7: Wasserstrom mit Gartenspritze



Abb. 8: Wasserstrom ohne Gartenspritze

Paul soll den Garten wässern. Mit welcher Methode wird er schneller fertig? Aus der Spritze strömt das Wasser offensichtlich schneller heraus, aber ist das überhaupt entscheidend? Die Diskussion führt uns zunächst zu Messbecher und Uhr, und schließlich zur Größe Stromstärke:

$$I_{Wasser} = \frac{V}{t} \text{ bzw. } I_{Wasser} = \frac{m}{t}.$$



Abb. 9: Messung der Wasserstromstärke

An dieser Stelle empfehlen wir wegen der immer wiederkehrenden Struktur der Formel die üblichen Rechenbeispiele:

$$\text{geg.: } V = 12 \text{ l, } t = 3 \text{ min} \quad \Rightarrow I_{Wasser} = ?$$

$$\text{geg.: } I_{Wasser} = 4 \text{ l/min, } t = 3 \text{ min} \quad \Rightarrow V = ?$$

$$\text{geg.: } V = 12 \text{ l, } I_{Wasser} = 3 \text{ l/min} \quad \Rightarrow t = ?$$

Selbstverständlich können die bei diesen Aufgaben verwendeten Werte aus einem Experiment wie in Abb. 9 gewonnen werden.

Paul bemerkt, dass die Stromstärke am Ende des Gartenschlauchs morgens größer ist als abends. Wovon hängt die Stromstärke denn nun ab? Doch wohl nicht von der Tageszeit!

Die Abhängigkeiten der Stromstärke vom Antrieb und vom Widerstand der Leitung können mit den Schülerinnen und Schülern in drei Wettkämpfen ermittelt werden.

Abhängigkeit vom Antrieb:

– Zwei Schüler blasen durch gleiche Schläuche eine Tüte auf.

Abhängigkeit vom Widerstand:

– Zwei Schüler blasen durch unterschiedlich dicke Schläuche gleicher Länge eine Tüte auf.

– Zwei Schüler blasen durch gleich dicke Schläuche verschiedener Länge eine Tüte auf.

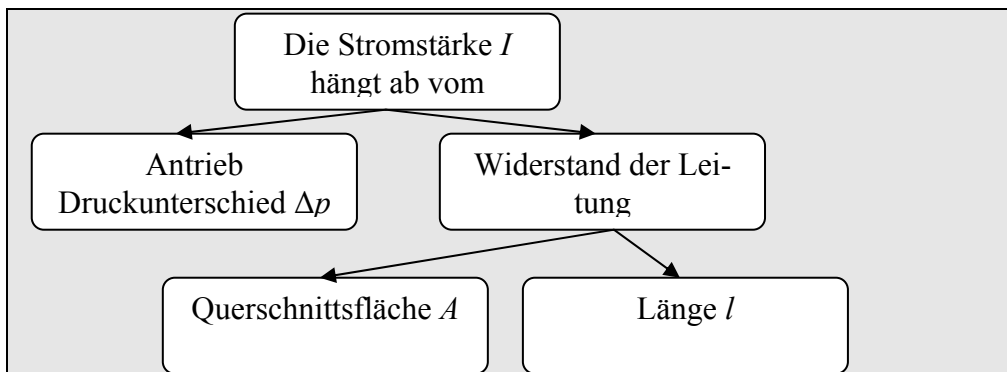
<sup>2</sup> An dieser Stelle ist es wichtig, den Unterschied zwischen Stromstärke und Strömungsgeschwindigkeit zu diskutieren, vgl. Aufgabe S6 in Kapitel 6.



Abb. 10: Wettkämpfe

Für die Dramaturgie ist folgendes Vorgehen sinnvoll: Der im ersten Wettkampf unterlegene Schüler siegt im zweiten Wettkampf, denn er erhält den kürzeren Schlauch.<sup>3</sup>

Der Wettkampf liefert uns Regel 4:



Im Bild 11 strömt Wasser durch einen langen Schlauch, in den mehrere dünne Löcher gestochen wurden. Warum nimmt die Höhe der Fontänen längs der Leitung ab? Die Höhe der Fontäne ist ein Maß für den Wasserdruck an dieser Stelle der Leitung. Der Druck sinkt längs der Leitung, da für jedes Teilstück ein Antrieb für den Wasserstrom erforderlich ist.



Abb. 11: Druckverlauf längs einer Leitung

Wenn wir das Ende des Schlauchs aber zuhalten, fließt (fast) kein Wasser mehr und der Antrieb  $\Delta p$  muss null werden. Der Druck ist überall gleich, und das Wasser spritzt jetzt aus allen Löchern (nahezu) gleich hoch.

<sup>3</sup> Für den Wettkampf eignen sich z. B. Schläuche mit 1 und 4 m Länge und 4 und 9 mm Durchmesser.

## 2.4. Der Stromkreis

Der abgebildete Wasserstromkreis<sup>4</sup> enthält alle für Stromkreise typischen Elemente: eine Pumpe, Leitungen, Verzweigungen, „Amperemeter“ und „Voltmeter“, sowie variable Widerstände. Die Wasserrädchen sind die „Amperemeter“ und messen die Stromstärke. Das Manometer ist das „Voltmeter“ und misst Druckdifferenzen. Statt dem Manometer kann man auch Steigrohre an verschiedenen Stellen des Stromkreises zur Druckmessung anbringen. Der Widerstand lässt sich durch die Hahnstellung variieren.

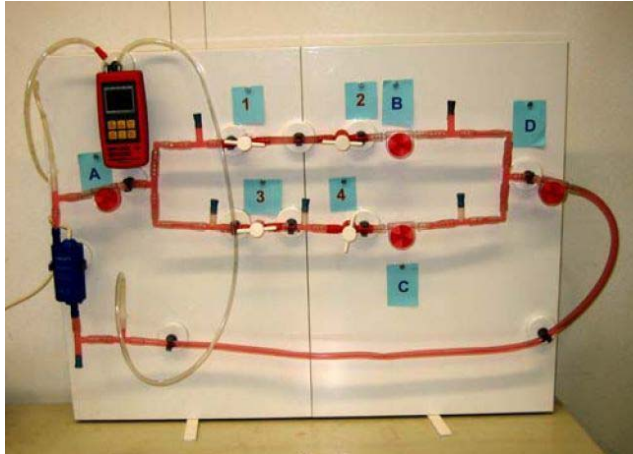


Abb. 12: Wasserstromkreis

Die Anordnung liefert die für Stromkreise bekannten Regeln:

- Knotenregel: Was in einen Knoten hineinströmt, strömt auch wieder heraus.
- Das Wasser strömt von Stellen hohen Drucks zu Stellen tiefen Drucks.
- Die Pumpe befördert das Wasser wieder von tiefem zu hohem Druck.
- Für die Serienschaltung gilt:  $\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_1 + \Delta p_2$ ,  $I_{\text{ges}} = I_1 = I_2$
- Für die Parallelschaltung gilt:  $\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_1 = \Delta p_2$ ,  $I_{\text{ges}} = I_1 + I_2$

## 2.5. Abschließende Bemerkungen

An dieser Stelle haben wir alle für das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept wesentlichen Begriffe in anschaulicher Weise erarbeitet. In den folgenden Kapiteln wird sich zeigen, dass diese Anschauungen auch in den klassischen physikalischen Teilgebieten Mechanik, Elektrizitätslehre und Wärmelehre tragfähig sind.

So wie Vokabeln Grundlage des Lernens einer Fremdsprache sind, gibt es auch in der Sprache der Physik einen Grundwortschatz, der für das Kapitel „Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen“ in der folgenden Tabelle zusammengefasst ist:

| Name                         | Symbol | Einheit           | Formel                         | Messgerät               |
|------------------------------|--------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Wasser- /<br>Luftmenge       | $V$    | l (1 kg)          | ---                            | Messbecher<br>Wasseruhr |
| Druck                        | $p$    | 1 bar,<br>1 Pa    | ---                            | Manometer<br>Barometer  |
| Wasser- /<br>Luftstromstärke | $I$    | 1 l/s<br>(1 kg/s) | $I = V / t$<br>( $I = m / t$ ) | ---                     |

<sup>4</sup> Der Wasserstromkreis ist unter der Bestellnummer 1080751 bei Conatex ([www.conatex.com](http://www.conatex.com)) erhältlich.

### **3. Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept in der Mechanik, Elektrizitätslehre und Wärmelehre**

#### **Vorbemerkung**

In diesem Kapitel zeigen wir, dass das für Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen entwickelte Konzept auch in anderen Teilgebieten der Physik trägt.<sup>5</sup> Was die Schülerinnen und Schüler in einem Teilgebiet bereits gelernt haben, kommt im nächsten wieder vor. Obwohl es sich um etwas Neues handelt, bleiben doch die Vorstellungen und die verwendeten Begriffe gleich. Das hilft den Schülerinnen und Schüler nicht nur beim Erlernen des Neuen, sondern festigt gleichzeitig auch das zuvor Gelernte.

Die Struktur des Strom-Antrieb-Widerstands-Konzeptes wird besonders augenfällig bei paralleler Darstellung der vier Teilgebiete. Im Unterricht werden die verschiedenen Gebiete aber *selbstverständlich hintereinander* behandelt.

#### **3.1. Was strömt?**

##### **3.1.1. Begriffsbildung**

Im letzten Kapitel haben wir Wasser- und Luftströme betrachtet. In der Mechanik werden wir es nun mit Strömen des Impulses zu tun haben, in der Elektrizitätslehre strömt elektrische Ladung und in der Wärmelehre Entropie. Die Aufgabe ist jetzt etwas schwieriger. Während sich alle Schülerinnen und Schüler etwas unter Luft- und Wasser vorstellen können, müssen wir nun zunächst eine Anschauung für die strömende Größe (elektrische Ladung, Impuls, Entropie) bilden.

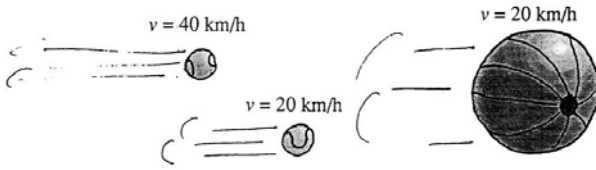

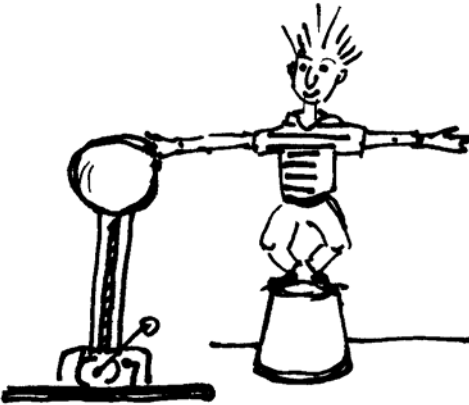

Was ist elektrische Ladung? Auf diese Frage erhalten die Schülerinnen und Schüler in den ersten Stunden keine erschöpfende Antwort. Die Schülerinnen und Schüler werden mit der Größe vertraut, indem sie von Stunde zu Stunde weitere Eigenschaften von  $Q$  kennen lernen. Die Begriffsbildung erfolgt also nicht in einer Stunde, sondern ist ein Prozess, der sich über die ganze Unterrichtseinheit erstreckt.

Gleiches gilt für den Impuls in der Mechanik und die Entropie in der Wärmelehre.

---

<sup>5</sup> Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept ist nicht nur in der Mechanik, Wärmelehre und Elektrizitätslehre anwendbar, sondern lässt sich auch auf chemische Reaktionen und Phasenübergänge übertragen. Näheres dazu findet sich z. B. in Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Ausgabe 2/55 (Aulis Verlag, März 2006, Themenheft „Physics Meets Chemistry“).

### 3.1.2. Einstieg in die Begriffsbildung:

|   |  |
|---|--|
|  <p>Abb. 1: Was ist Impuls?</p> <p>Die Schülerinnen und Schüler werden abgeholt bei einem Begriff der Umgangssprache: Die Begriffe Wucht oder Schwung aus der Umgangssprache entsprechen weitgehend dem, was der Physiker Impuls nennt.</p>                                |  <p>Abb. 2: Was ist Entropie?</p> <p>Auch für die Größe Entropie gibt es eine sehr gute Entsprechung in der Umgangssprache: Wärme oder Wärmemenge.</p> |
|  <p>Abb. 3: Was ist elektrische Ladung?</p> <p>Damit sind wir aus dem Alltag weniger vertraut, auch der Begriff Elektrizität ist als Aufhänger kaum hilfreich. Dass sich auf dem Schüler elektrische Ladung befindet, erkennen wir aber an seinen abstehenden Haaren.</p> |  <p>Abb. 4: Was ist eine Flüssigkeits- oder Gasmenge?</p> <p>Das ist den Schülerinnen und Schüler klar.</p>   |

#### Bemerkungen:

- eigene Erfahrungen mit der Elektrizität sind für die Schülerinnen und Schüler zwar außerordentlich prickelnd, aber die hier und im Folgenden beschriebenen Hochspannungsexperimente mit Schülern sind verboten. Also sind bei Experimenten im Unterricht die Schüler durch Konduktorkugeln und die Haare durch aufgesetzte Papierbüschel zu ersetzen.
- Eine technische Umsetzung der abstehenden Haare bzw. der Papierbüschel in ein Messgerät ist das Elektroskop.



### 3.1.3. Wo ist mehr enthalten?



Abb. 5: Welcher Ball enthält mehr Impuls?

Ein Ball enthält umso mehr Impuls,  
 – je größer seine Geschwindigkeit,  
 – je schwerer er ist.



Abb. 6: In welchem Becherglas ist mehr Entropie enthalten?

Ein Gegenstand enthält umso mehr Entropie,  
 – je höher seine Temperatur,  
 – je größer er ist.

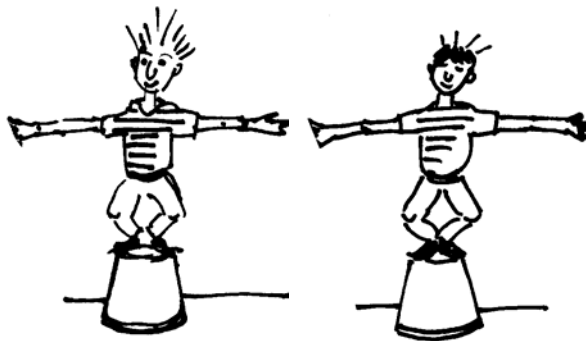


Abb. 7: Auf welchem Schüler sitzt mehr elektrische Ladung?

Auf einem Schüler befindet sich umso mehr elektrische Ladung,  
 – je höher das Potenzial ist, mit dem er aufgeladen wurde,  
 – je größer er ist.



Abb. 8: Welcher Autoreifen enthält mehr Luft?

In einem Autoreifen ist umso mehr Luft enthalten,  
 – je höher der Druck ist, der in ihm herrscht,  
 – je größer der Autoreifen ist.

#### Bemerkungen:

- In allen Teilgebieten ist es wichtig, deutlich zwischen der strömenden Größe und der zugehörigen intensiven Größe (Geschwindigkeit, Temperatur, elektrisches Potenzial, Druck) zu unterscheiden. So enthält ein schwerer Körper bei gleicher Geschwindigkeit mehr Impuls als ein leichter.
- Man kann die genannten Regeln physikalisch exakter fassen, indem man angibt, welche physikalische Größe als Maß für den mit Impuls, Entropie, elektrischer Ladung oder Luft



beladenen Gegenstand zu verwenden ist. Beim Impuls würde man etwa formulieren: „Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je größer seine Geschwindigkeit und je *größer seine Masse* ist.“ (Es lohnt sich auch durchaus, irgendwann im Physikunterricht zu diskutieren, dass man verschiedene Möglichkeiten hat, um die Menge oder Größe eines Gegenstandes festzulegen, wobei Masse, Stoffmenge und Volumen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern können.)

- Selbstverständlich ist auch für die intensiven Größen (Geschwindigkeit, Temperatur, elektrisches Potenzial und Druck) eine Begriffsbildung in unterschiedlichem Umfang erforderlich. Die Größen Geschwindigkeit und Temperatur sind den Schülerinnen und Schülern ausreichend geläufig, sie kennen Einheiten und Messgeräte dieser Größen. Anders verhält es sich mit den Größen elektrisches Potenzial und Druck. Ein Vorschlag zur Einführung des Drucks wurde schon in Kapitel 2 beschrieben. Ähnlich verfahren wir bei der Einführung des elektrischen Potenzials: Das Potenzial oder die Voltzahl ist das, was mit dem Voltmeter (bei geerdetem „Minuspol“) gemessen wird<sup>6</sup>.
- Für die Größe Elektrizität bringen die Schülerinnen und Schüler keine Alltagserfahrungen mit. Um ein Gefühl für sie zu bekommen, ist es hilfreich, einige Messungen mit dem Messverstärker (Ladungsmessung) durchzuführen.

### 3.1.4. Grundwortschatz und Stützwerte:

Es folgt eine Übersicht über die in den vier Gebieten verwendeten Vokabeln. Es ist eine didaktische Entscheidung, an dieser Stelle nicht mit zusammengesetzten Einheiten zu beginnen. Für die Einheit 1 Ct (1 Carnot) gilt:  $1 \text{ Ct} = 1 \text{ J/K}$ . Analog vereinbaren wir für die Einheit der Größe Impuls 1 Hy (1 Huygens):  $1 \text{ Hy} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ .

#### Mechanik

| Name            | Symbol | Einheit | Formel    | Messgerät  |
|-----------------|--------|---------|-----------|------------|
| Impuls          | $p$    | 1 Hy    | ---       | ---        |
| Geschwindigkeit | $v$    | 1 m/s   | $v = s/t$ | Tachometer |

- Ein Gegenstand mit der Geschwindigkeit  $v = 1 \text{ m/s}$  und der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  enthält den Impuls  $p = 1 \text{ Hy}$ .
- Ein Tennisball enthält nach dem Aufschlag ( $m = 0,1 \text{ kg}$ ,  $v = 100 \text{ km/h}$ ) ca. 3 Hy.
- Ein Fußgänger ( $m = 70 \text{ kg}$ ,  $v = 4 \text{ km/h}$ ) enthält ca. 80 Hy.
- Impulsschätzungen für weitere Beispiele.

#### Wärmelehre

| Name              | Symbol      | Einheit | Formel | Messgerät   |
|-------------------|-------------|---------|--------|-------------|
| Entropie (=Wärme) | $S$         | 1 Ct    | ---    | ---         |
| Temperatur        | $\vartheta$ | 1°C     | ---    | Thermometer |

- $1 \text{ cm}^3$  Wasser der Temperatur  $\vartheta = 30^\circ\text{C}$  enthält ca. 4 Ct.
- Um 1 g Eis zu schmelzen, braucht man ca. 1 Ct.
- Wenn man 70 g Wasser ca. 1 Ct zuführt, erhöht sich die Temperatur um  $1^\circ\text{C}$ .

#### Elektrizitätslehre

<sup>6</sup> Eine ausführliche Darstellung findet man in: Der Karlsruher Physikkurs SI, Band 2: Daten, Elektrizität, Licht, S. 28ff (AULIS-Verlag).

| Name                      | Symbol    | Einheit | Formel | Messgerät                          |
|---------------------------|-----------|---------|--------|------------------------------------|
| Elektrizität<br>(=Ladung) | $Q$       | 1 C     | ---    | Messverstärker<br>(„Coulombmeter“) |
| Potenzial<br>(Voltzahl)   | $\varphi$ | 1 V     | ---    | Voltmeter                          |

*Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen*

| Name               | Symbol       | Einheit       | Formel | Messgerät             |
|--------------------|--------------|---------------|--------|-----------------------|
| Volumen<br>(Masse) | $V$<br>$(m)$ | 1 l<br>(1 kg) | ---    | Messbecher<br>(Waage) |
| Druck              | $p$          | 1 Pa          | ---    | Manometer             |

### 3.1.5. Was passiert mit dem Impuls beim Crash?

Wir machen erste Gehversuche mit den neuen Größen.

Versuch: Auf der Luftkissenfahrbahn stößt ein Gleiter elastisch bzw. unelastisch auf einen Gleiter gleicher Masse.

Beobachtung: Beim elastischen Stoß steht der erste Gleiter, und der zweite Gleiter fährt weiter. Beim unelastischen Stoß hängen die Gleiter nach dem Stoß aneinander und fahren langsamer weiter.

Bei der Erklärung verwenden wir die neue Größe Impuls:

Der Impuls ist im ersten Fall vom stoßenden auf den zunächst ruhenden Gleiter übergegangen, im zweiten Fall hat er sich auf die beiden Gleiter verteilt.

Statt auf der Luftkissenbahn können die Experimente näher an der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler auch mit Inline-Skates durchgeführt werden.

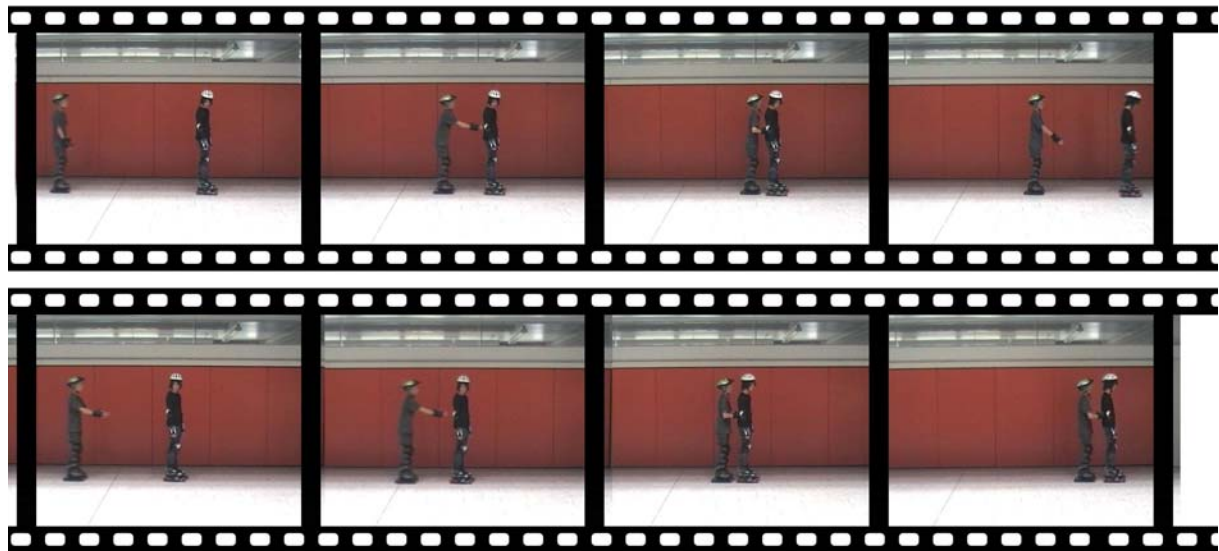


Abb. 9: Impulsübertragung bei Inline-Skatern

Aufgabe: Gibt es in den anderen Teilgebieten der Physik entsprechende Beobachtungen?

- E-Lehre: Ein aufgeladener Schüler gibt dem nicht geladenen Schüler die Hand. Ladung fließt vom einen zum anderen Schüler.
- Wärmelehre: Ein Löffel wird in die Tasse Kaffee gestellt. Entropie fließt vom heißen Kaffee in den kühleren Löffel.

- Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen: Zwei Reifen werden durch einen Schlauch miteinander verbunden. Luft fließt vom Reifen, in dem der höhere Druck herrscht, in den anderen Reifen.

### 3.1.6. Der Impuls kann auch negative Werte haben

Versuch: Auf der Luftkissenfahrbahn fahren zwei Gleiter gleicher Masse in etwa gleich schnell aufeinander zu und stoßen unelastisch.

Wir beobachten, dass die Gleiter nach dem Stoß in Ruhe sind.

D. h. nach dem Stoß haben beide Gleiter den Impuls 0 Hy. Wenn die Impulssumme 0 Hy ist, muss vor dem Stoß ein Summand negativ gewesen sein.

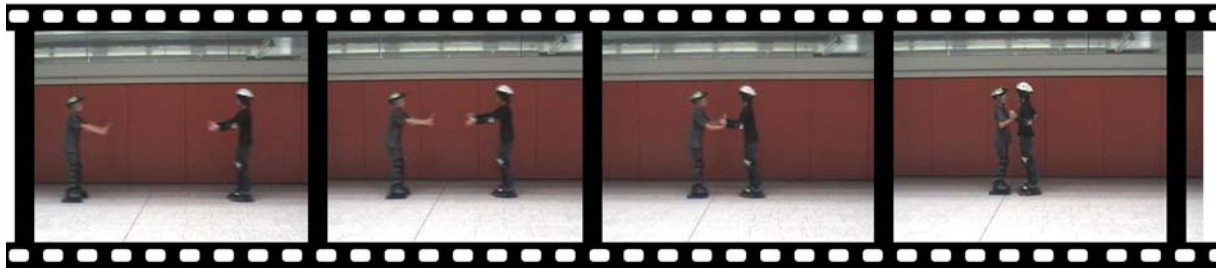


Abb. 10: Frontalzusammenstoß bei Inline-Skatern

Wir vereinbaren daher<sup>7</sup>:

- Gegenstände, die sich nach rechts bewegen, tragen positiven Impuls.
- Gegenstände, die sich nach links bewegen, tragen negativen Impuls.

Aufgabe: Gibt es in den anderen Teilgebieten der Physik entsprechende Beobachtungen?

- E-Lehre: Die geladenen Konduktorkugeln einer Influenzmaschine werden verbunden.  
Beobachtung: Danach sind beide Kugeln ungeladen.  
Erklärung: Wenn die Ladungssumme 0 C ist, muss ein Summand negativ sein.
- Wärmelehre: Eine Analogie werden die Schülerinnen und Schüler nicht finden. Aus Aufgabe W5 ergibt sich: die Entropie kann nur positive Werte haben.
- Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen: Eine Glasglocke wird evakuiert. Bei  $p = 0$  bar ist alle Luft herausgepumpt. Weiterpumpen führt nicht zu negativen Luftmengen.

In der Elektrizitätslehre wird üblicherweise kein großes Aufheben davon gemacht, dass die Ladung eine Erhaltungsgröße ist. Entsprechend gehen wir in der Mechanik beim Impuls vor. Tatsächlich weisen die Argumentationen der Schülerinnen und Schüler zu dem Experiment in Abb.10 darauf hin, dass sie die Erhaltungseigenschaft des Impulses als „normal“ empfinden. Das Besondere ist dann eher die Erfahrung, dass die Entropie in der Wärmelehre keine Erhaltungsgröße ist.

### 3.1.7. Wie wird der Impuls gemessen?

Die Geschwindigkeit messen wir mit dem Tachometer. Doch mit welchem Messgerät misst man den Impuls?

Die Impulsmessung erfolgt indirekt über die Formel  $p = m \cdot v$ . Zur Ermittlung der Formel kann wie folgt vorgegangen werden:

---

<sup>7</sup> Da wir zunächst nur horizontale Bewegungen in einer Richtung betrachten, kann diese Komponente des Impulsvektors wie eine skalare Größe behandelt werden.

i)  $p \sim m$

Ein Körper mit der Masse  $m = 1 \text{ kg}$  und  $v = 1 \text{ m/s}$  trägt den Impuls  $p = 1 \text{ Hy}$ . Zwei solche Körper tragen also zusammen den Impuls  $p = 2 \text{ Hy}$  und haben zusammen die Masse  $m = 2 \text{ kg}$ , etc.

ii)  $p \sim v$

Ein Gleiter stößt unelastisch auf einen Gleiter gleicher Masse. Der Impuls verteilt sich beim Stoß auf den Verband der beiden Gleiter. Ein Gleiter trägt also nur den halben Impuls. Die Messung ergibt, dass auch  $v$  sich halbiert hat, etc.

iii)  $p = m \cdot v$

Aus i), ii) folgt  $p = k \cdot m \cdot v$ , aus i) folgt zudem  $k = 1$  und  $1 \text{ Hy} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ .<sup>8</sup>

Problemlos ist die Ladungsmessung. In jeder Physiksammlung ist der dazu erforderliche Messverstärker vorhanden. Wassermengen werden in Messbechern gemessen. Die Entropie wird wie der Impuls indirekt gemessen<sup>9</sup>.

## 3.2. Ströme brauchen einen Antrieb

### 3.2.1. Nicht nur Luft strömt

Im letzten Kapitel haben wir die mengenartigen Größen der Mechanik, Elektrizitätslehre und Wärmelehre kennen gelernt. Sollen sie strömen, brauchen wir wie bei Luftströmungen eine Differenz der zugehörigen intensiven Größen als Antrieb. Zum Impuls gehört die Geschwindigkeit, zur elektrischen Ladung das elektrische Potenzial und zur Entropie die Temperatur.

Wir beobachten, was bei den nachstehenden Experimenten geschieht.



Abb. 1: Luftstrom

Das Reifenexperiment kennen wir schon. Es führte zu der Regel:

Luft (Wasser) strömt von selbst von Stellen hohen Drucks zu Stellen tiefen Drucks.

Die Luft hört auf zu strömen, wenn der Druckunterschied gleich null ist.

Der Druckunterschied ist ein Antrieb für einen Luftstrom.

<sup>8</sup> Tatsächlich kann man den Impuls eines Körpers auch ohne Verwendung von  $p = m \cdot v$  direkt messen. Allerdings ist die Methode nicht sehr praktisch und alltagstauglich. Um etwa den Impuls eines Gleiters auf der Luftkissenbahn zu bestimmen beschießt man ihn inelastisch und gegen die Fahrtrichtung mit so vielen „Messkörpern“ (z. B. Luftgewehrkugeln) bis er stillsteht. Trägt jeder Messkörper eine Impulseinheit und benötigt man  $x$  Messkörper, so hatte der Gleiter ursprünglich  $x$  Einheiten Impuls.

<sup>9</sup> Siehe: Der Karlsruher Physikkurs SII, Band 2: Thermodynamik, S. 25ff (AULIS-Verlag).

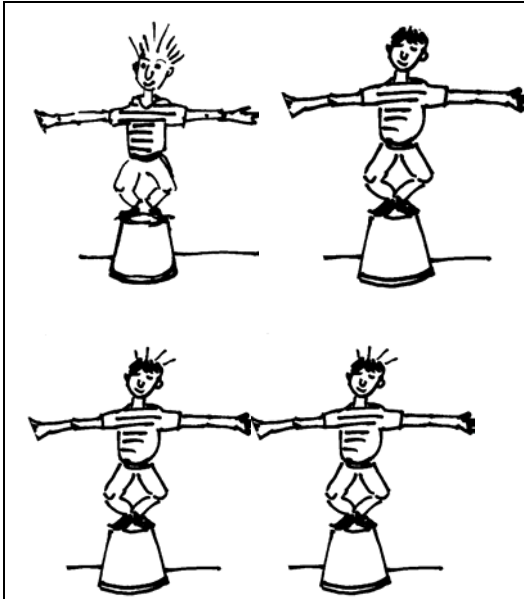


Abb. 2: Ladungsstrom

Ein zuvor durch einen Bandgenerator aufgeladener Schüler A berührt die Glimmlampe, die ein nicht aufgeladener Schüler B in der Hand hält. Die Potenziale vorher und nachher werden gemessen.

Beobachtungen:

1. Im Moment des Berührens kurzer Schmerz, Aufleuchten der Glimmlampe, leiser „Donner“.
2. Haare von A stehen nach dem Berühren weniger hoch, die von B stellen sich ein wenig.
3. Vor dem Berühren: A befindet sich auf hoher Voltzahl, B auf dem Potenzial 0V. Nach dem Berühren befinden sich beide auf gleichem Potenzial.

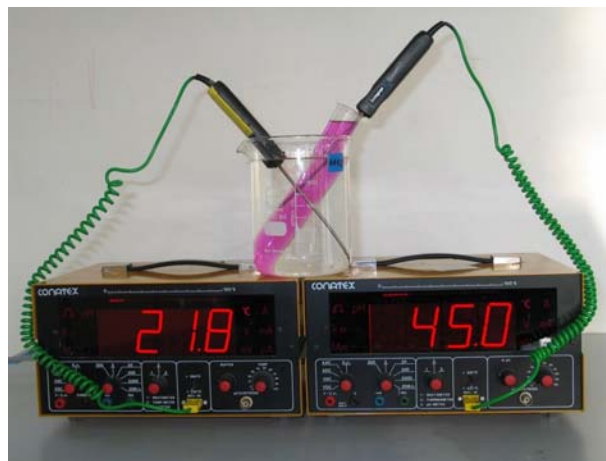


Abb. 3: Entropiestrom

Ein Reagenzglas mit heißem Wasser A wird in ein Gefäß mit kaltem Wasser B gestellt. Die Temperaturen werden zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen.

Beobachtung:

$\vartheta_A$  nimmt ab,  $\vartheta_B$  nimmt zu. Am Ende befinden sich beide Gefäße auf gleicher Temperatur.



Abb. 4: Impulsstrom

Ein Skater fährt auf einen ruhenden anderen Skater auf.

Beobachtung:

Beim Auffahren wird der Skater A langsamer, Skater B hingegen schneller. Am Ende haben beide die gleiche Geschwindigkeit.

Die Erkenntnis fällt nicht schwer, dass alle vier Versuche in gleicher Weise zu beschreiben sind:

Elektrizität strömt von selbst von Stellen hohen Potentials zu Stellen tiefen Potentials.  
Die Elektrizität hört auf zu strömen, wenn der Potentialunterschied gleich null ist.  
Der Potentialunterschied (= Spannung) ist ein Antrieb für einen Elektrizitätsstrom.

Entropie strömt von selbst von Stellen hoher Temperatur zu Stellen tiefer Temperatur.  
Die Entropie hört auf zu strömen, wenn der Temperaturunterschied gleich null ist.  
Der Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.

Impuls strömt von selbst von Stellen hoher Geschwindigkeit zu Stellen tiefer Geschwindigkeit.  
Der Impuls hört auf zu strömen, wenn der Geschwindigkeitsunterschied gleich null ist.  
Der Geschwindigkeitsunterschied ist ein Antrieb für einen Impulsstrom.

Beachte:

Die Regel sagt aus, dass Elektrizität stets von „+ nach –“ strömt. Die traditionelle Unterscheidung zwischen „technischer Stromrichtung“ und „physikalischer Stromrichtung“ beruht auf einer Verwechslung von Ladungsstrom (Strom der physikalischen Größe  $Q$ ) und Ladungsträgerstrom (Strom von Teilchen, z. B. Elektronen).

Man mache sich dies an folgendem Beispiel klar. Eine positiv geladene Kugelfläche A und eine negativ geladene Kugelfläche B werden leitend verbunden. Dabei nimmt die elektrische Ladung  $Q_A$  der positiv geladenen Kugel A ab, während die Ladung  $Q_B$  der negativ geladenen Kugel B gleichzeitig um denselben Wert ansteigt. Der elektrische Strom fließt also von A nach B. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Art der Elektrizitätsträger: Wenn die Elektrizitätsträger Elektronen sind, dann fließen die Elektrizitätsträger von B nach A. Bei positiv geladenen Elektrizitätsträgern fließen sie von A nach B. Die Elektrizität strömt aber übereinstimmend mit der obigen Regel immer von + nach –.

Der oben beschriebene Versuch macht zudem deutlich:

Fließende Elektrizität tut weh, ruhende nicht.

In der Mechanik verhält es sich ebenso: Wer schnell fährt, dem tut der Impuls nicht weh, der in ihm steckt. Gefahr besteht erst beim Crash, wenn plötzlich ein großer Impulsstrom fließt.

Auch hier gilt: Fließender Impuls kann Knochen brechen, „ruhender“ nicht.

### 3.2.2. Erden

Aufgabe: Kann man in den 4 Bildern ein gemeinsames Phänomen erkennen?

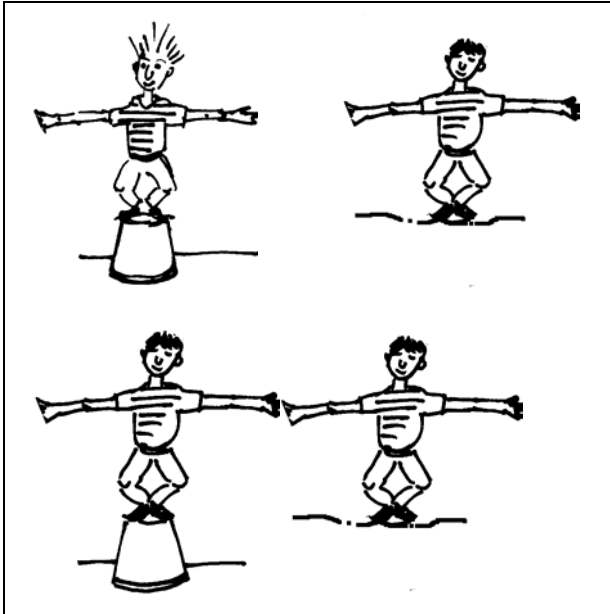


Abb. 5: elektrische Erdung

Ein zuvor durch einen Bandgenerator aufgeladener Schüler A berührt einen auf dem Boden stehenden Schüler B. Die Potentiale vorher und nachher werden gemessen.



Abb. 6: thermische Erdung

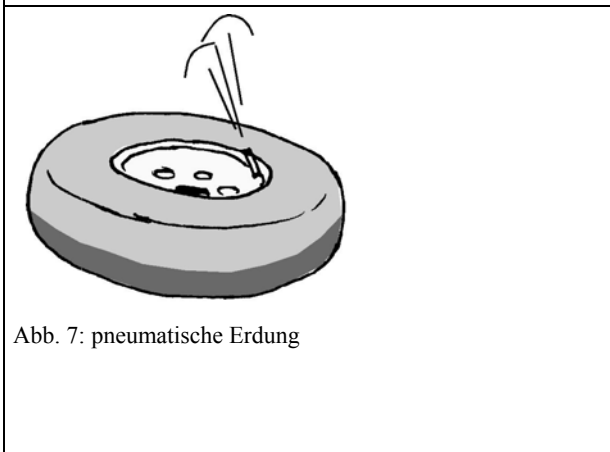


Abb. 7: pneumatische Erdung



Abb. 8: mechanische Erdung, der Inliner rollt aus, bis er steht.

In Abb. 5 beobachten wir, dass bei beiden Schülern die Haare nicht mehr zu Berge stehen. Elektrizität ist in die Erde abgeflossen. Die Schüler sind geerdet.

Sinngemäß gilt das auch in den anderen drei Gebieten: Entropie, Luft und Impuls sind in die Atmosphäre bzw. Erde abgeflossen. Am Ende hat der Gegenstand das gleiche Potenzial, die gleiche Temperatur, den gleichen Druck oder die gleiche Geschwindigkeit wie die Erde, der Gegenstand ist jeweils „geerdet“.

### 3.2.3. Kann Elektrizität auch von Stellen tiefen Potentials zu Stellen hohen Potentials fließen?

Wir stellen uns die gleiche Frage zunächst in dem Gebiet, das wir bereits besprochen haben:

Kann Luft auch von Stellen tiefen Drucks zu Stellen hohen Drucks fließen?

Wir wissen bereits: Dazu ist eine Luftpumpe erforderlich. Also benötigen wir wohl in der Elektrizitätslehre eine Elektrizitätspumpe. Was aber ist eine Elektrizitätspumpe? Da gibt es viele Realisierungen: die Batterie, die Influenzmaschine, das Netzgerät. Alle Geräte leisten

das Verlangte: Sie pumpen Elektrizität von Stellen tiefen Potentials zu Stellen hohen Potentials.

Gibt es auch Entropiepumpen? Sicher, sie heißen im Alltag Wärmepumpen. Der Kühlschrank ist ein Beispiel, das jeder kennt. Innen am Entropieeingang kalt, an der Rückseite am Entropieausgang warm. Die Entropie wird von Stellen tiefer Temperatur zu Stellen hoher Temperatur gepumpt.<sup>10</sup> Es fällt auch nicht schwer, Impulspumpen aufzuspüren: der Automotor oder unsere Muskeln sind Impulspumpen. Beide pumpen den Impuls aus der Erde (Stelle niedriger Geschwindigkeit) in das Auto bzw. Fahrrad (Stelle hoher Geschwindigkeit).



Abb. 9: Luftpumpe

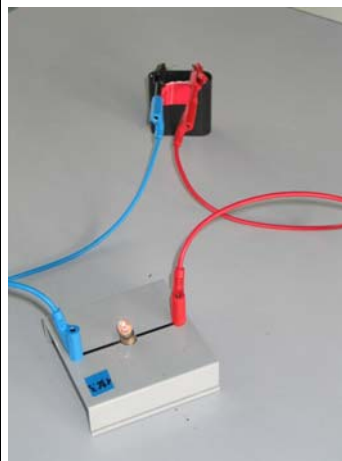


Abb. 10: Ladungspumpe



Abb. 11: Wärmepumpe



Abb. 12: Impulspumpe

### 3.2.4. Leiter und Isolatoren

Wir diskutieren mit den Schülerinnen und Schülern: Wozu brauchen wir Luftkissen, Kugellager etc.?

Ohne Luftkissen fließt der Impuls aus dem bewegten Körper in die Erde. Luftkissen, Kugellager etc. dienen der Impulsisolation.

Stangen, Seile, aber auch Felder (Magnetfelder – vgl. Abbildung –, Elektrische Felder und Gravitationsfelder) leiten den Impuls.

<sup>10</sup> Ein weiteres Beispiel für Wärmepumpen, mit denen man im Unterricht auch gut experimentieren kann, sind Peltierelemente. Sie sind im Elektronikhandel recht günstig zu bekommen und in beiden Richtungen, d.h. als Wärmepumpe und „Thermo-Batterie“ einsetzbar. Der in vielen Sammlungen vorhandene „Thermo-Konverter“ (vgl. Abbildung zu Aufgabe W4) enthält ebenfalls ein Peltierelement.



Aufgabe: Gibt es in den anderen Teilgebieten der Physik entsprechende Beobachtungen?

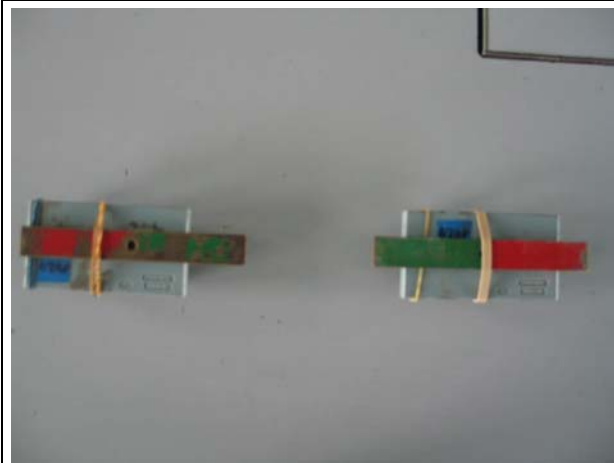


Abb. 13: Magnetfeld als Impulsleiter



Abb. 14: Kabel als elektrische Leiter



Abb. 15: Styropor als Wärmeisolator



Abb. 16: Gasleitung

### 3.3. Die Stromstärke

#### 3.3.1. Was ist eine Stromstärke?

Nicht nur in der Elektrizitätslehre sind Stromstärken sinnvoll. Wenn wir in allen Teilgebieten von Strömen reden, gehört dazu selbstverständlich jeweils eine Stromstärke.

Stromstärken werden dabei immer nach dem gleichen Schema gebildet:

*Stromstärke = Menge der vorbeiströmenden Größe / Zeit*

Daraus ergibt sich:

|  |  |
|--|--|
| <p>Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen</p> $I_{Wasser} = \frac{V}{t} \text{ oder } I_{Wasser} = \frac{m}{t}$ <p>Rechenbeispiele<sup>11</sup>:</p> <p>geg.: <math>V = 12 \text{ l}, t = 3 \text{ min} \rightarrow I_{Wasser} = ?</math></p> <p>geg.: <math>I_{Wasser} = 3 \text{ l/min}, t = 4 \text{ min} \rightarrow V = ?</math></p> <p>geg.: <math>V = 12 \text{ l}, I_{Wasser} = 3 \text{ l/min} \rightarrow t = ?</math></p> | <p>Elektrizitätslehre</p> $I = \frac{Q}{t}, \text{ Einheit } 1 \text{ C/s} = 1 \text{ A}$ <p>Rechenbeispiele:</p> <p>geg.: <math>Q = 12 \text{ C}, t = 3 \text{ s} \rightarrow I = ?</math></p> <p>geg.: <math>I = 3 \text{ A}, t = 4 \text{ s} \rightarrow Q = ?</math></p> <p>geg.: <math>Q = 12 \text{ C}, I = 3 \text{ A} \rightarrow t = ?</math></p>   |
| <p>Wärmelehre</p> $I_S = \frac{S}{t}, \text{ Einheit } 1 \text{ Ct/s}$ <p>Rechenbeispiele:</p> <p>geg.: <math>S = 12 \text{ Ct}, t = 3 \text{ s} \rightarrow I_S = ?</math></p> <p>geg.: <math>I_S = 3 \text{ A}, t = 4 \text{ s} \rightarrow S = ?</math></p> <p>geg.: <math>S = 12 \text{ Ct}, I_S = 3 \text{ Ct/s} \rightarrow t = ?</math></p>   | <p>Mechanik</p> $F = \frac{P}{t}, \text{ Einheit } 1 \text{ Hy/s} = 1 \text{ N (Newton)}$ <p>Rechenbeispiele:</p> <p>geg.: <math>p = 12 \text{ Hy}, t = 3 \text{ s} \rightarrow F = ?</math></p> <p>geg.: <math>F = 3 \text{ N}, t = 4 \text{ s} \rightarrow p = ?</math></p> <p>geg.: <math>p = 12 \text{ Hy}, F = 3 \text{ N} \rightarrow t = ?</math></p> |

Beachte:

Impulsstromstärke und Kraft sind zwei Bezeichnungen für die gleiche Größe. Zumindest für den Lehrer ist es gewiss faszinierend festzustellen, dass zu einer Größe verschiedene Bezeichnungen existieren, die sowohl unterschiedliche Sprechweisen als auch unterschiedliche Vorstellungen nach sich ziehen.

Das wird z. B. in Aufgabe M8 deutlich. Dort formulieren wir die Newtonschen Axiome und den Satz vom Kräftegleichgewicht sowohl in der Impulssprache als auch in der Kraftsprache.

In der Aufgabe M7 wird experimentell die Formel  $F = \frac{P}{t}$  bestätigt.

### 3.3.2. Wie werden Stromstärken gemessen?

Welche Messgeräte sind zu verwenden? Wie sind die Messgeräte zu schalten?

Zur Messung der elektrischen Stromstärke verwenden wir ein Amperemeter. Dazu wird die Leitung aufgetrennt und das Amperemeter so eingebaut, dass der Strom durch das Gerät fließt. Nutzt man von  $F$  das Bild der Impulsstromstärke, so wird einem nicht entgehen, dass es sich bei der Messung von  $F$  mit einem Newtonmeter genau so verhält.

Zur Messung der Entropiestromstärke  $I_S$  steht uns kein Messgerät zur Verfügung, das eine direkte Messung zuließe. Die Messung erfolgt hier indirekt über eine Formel, die in dem Band Energie und Energieträger erarbeitet wird:  $P = T \cdot I_S$ .

Sehr anschaulich ist natürlich die Messung von Wasserstromstärken mit Messbecher und Stoppuhr.

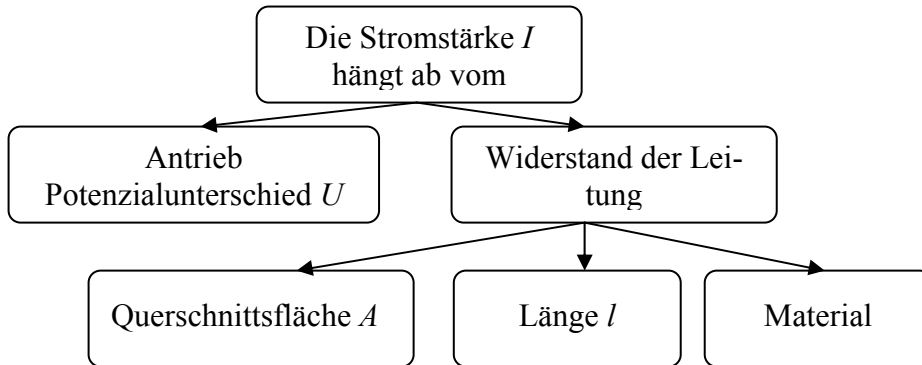
### 3.3.3. Wovon die Stromstärke abhängt

Wir fragen uns, wovon die Stromstärke abhängt. In der Wärmelehre stellt sich die Frage etwa beim Heizen. Wie viel Entropie strömt im Winter pro Sekunde durch die Hauswände nach draußen? Dass das nicht nur von den Temperaturen drinnen und draußen abhängt, sondern auch von der Dicke, der Größe und dem Material der Hauswände, ist für die Schülerinnen und Schüler nicht besonders erstaunlich. Interessanter finden die Schülerinnen und Schüler

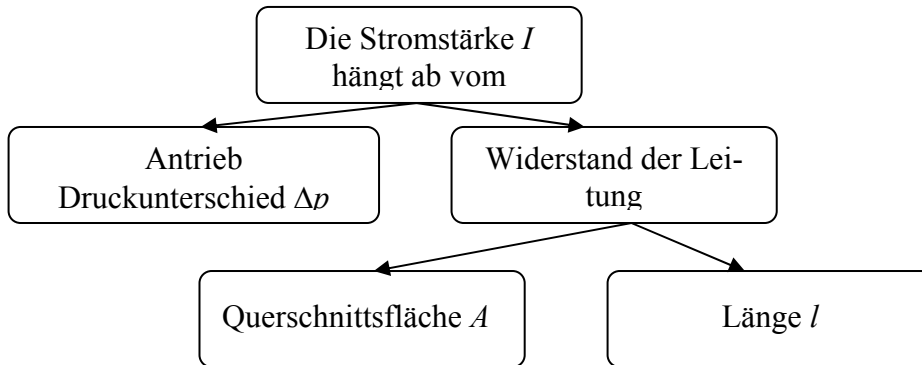
<sup>11</sup> Im Unterricht können diese Standardbeispiele durch Aufgaben mit Alltagsbezug ersetzt werden.

erfahrungsgemäß die bereits beschriebenen Wettkämpfe. Beim Aufblasen der Tüten durch verschiedene Schläuche erleben sie die gleichen Zusammenhänge am eigenen Leib. Der Physiklehrer hingegen kennt die Gesetze aus der Elektrizitätslehre. In der Mechanik existieren entsprechende Zusammenhänge, die aber i. a. weder Schülern noch Lehrern geläufig sind. Das Thema führt auf den Begriff Zähigkeit, der zu weit von unseren Curricula entfernt ist, als dass wir ihn hier vertiefen sollten.

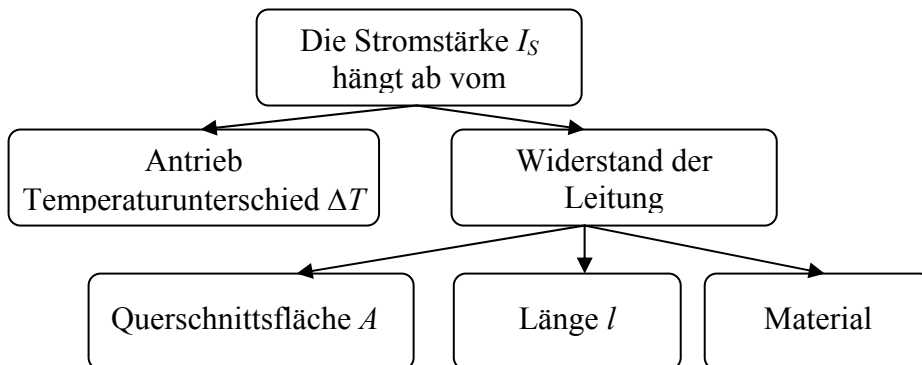
Elektrizitätslehre:



Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen:



Wärmelehre:



Bemerkung:

Zur Vertiefung der Zusammenhänge sei auf das in Aufgabe E8 beschriebene Praktikum zu Kennlinien hingewiesen. Das Praktikum führt unter anderem zur Definition der Größe Widerstand  $R = U/I$ . Ist dieser Quotient für ein Bauteil konstant, so sagt man, es erfüllt das Ohmsche Gesetz.

### 3.3.4. Grundwortschatz

Wir erweitern unsere Tabelle mit dem Grundwortschatz<sup>12</sup>:

| Name                           | Symbol       | Einheit        | Formel                  | Messgerät                    |
|--------------------------------|--------------|----------------|-------------------------|------------------------------|
| Wasserstromstärke              | $I_{Wasser}$ | 1 l/s (1 kg/s) | $I = V/t$ ( $I = m/t$ ) | ---                          |
| Elektrische Stromstärke        | $I$          | 1 C/s = 1 A    | $I = Q/t$               | Amperemeter                  |
| Entropiestromstärke            | $I_S$        | 1 Ct/s         | $I_S = S/t$             | ---                          |
| Impulsstromstärke<br>(= Kraft) | $F$          | 1 Hy/s = 1 N   | $F = p/t$               | Newtonmeter<br>(Kraftmesser) |

## 3.4. Der Stromkreis

Stromkreise sind ein zentrales Thema der Elektrizitätslehre und die Analogie zu Wasserstromkreisen ist ein bewährtes didaktisches Hilfsmittel. Aber auch in der Mechanik und der Wärmelehre entdecken wir zwanglos Stromkreise.

### 3.4.1. Serienschaltung mit zwei Lämpchen

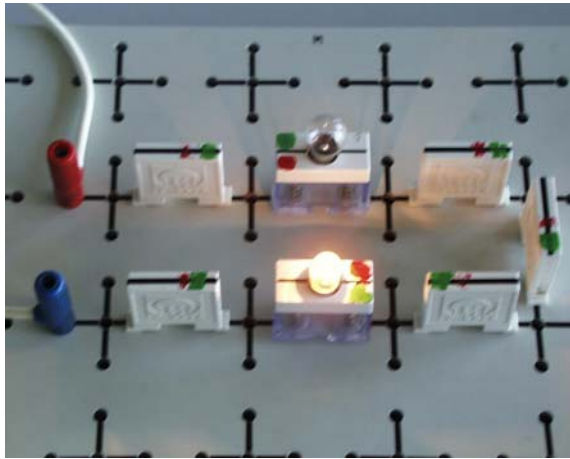


Abb. 1: Serienschaltung

Das obere Lämpchen (12V/0,25A) leuchtet nicht. „Verbraucht“ das untere Lämpchen (4V/0,1A) die ganze Elektrizität?

Die Schülerinnen und Schüler sollten inzwischen mit der Größe Ladung gut genug vertraut sein, um zu wissen, dass Ladung nicht verbraucht wird. Daraus ergibt sich die korrekte Erklärung von Abb.1, die durch eine Messung bestätigt werden kann.

Als Zusatzaufgabe tragen die Schülerinnen und Schüler nun Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe im Stromkreis ein<sup>13</sup> und erklären danach die Vorgänge mit den Begriffen des Strom-Antriebs-Konzepts. Die bislang erarbeiteten Regeln sind dafür ausreichend:

- Die Elektrizität strömt vom Pluspol der Batterie (Stelle hohen Potentials) zum Minuspol der Batterie (Stelle tiefen Potentials). In der Batterie wird die Elektrizität wieder von tiefem zu hohem Potenzial gepumpt.

<sup>12</sup> Zu den Einheiten Ct und Hy vgl. 3.1.4.

<sup>13</sup> Das Einfärben von Leitungsabschnitten verschiedenen Potentials mit unterschiedlichen Farben ist ein einfaches, aber mächtiges Werkzeug zur Analyse von elektrischen Schaltungen. Viele Beispiele dazu finden sich im Aufgabenteil zur Elektrizitätslehre.

– Für die Serienschaltung finden wir:  $I_1 = I_2 = I_3$ ,  $U_B = U_1 + U_2$ ,  $R_G = R_1 + R_2$

Beachte: Im Stromkreis fließt die Ladung, nicht das Potenzial.

### 3.4.2. Parallelschaltung

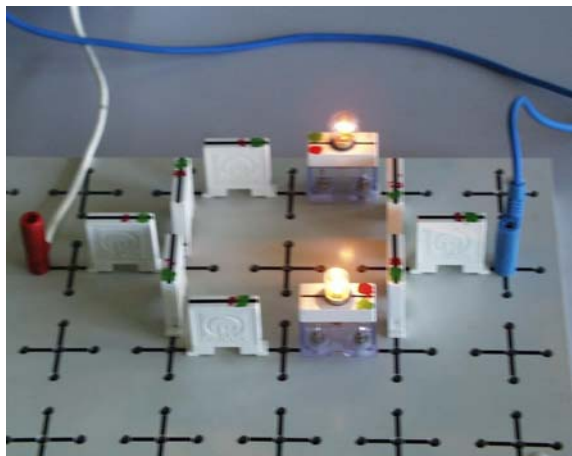


Abb. 2: Parallelschaltung

Die Schülerinnen und Schüler erhalten nun die Aufgabe, in der Parallelschaltung die Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe zu markieren und dann den Strom- Antriebs-Konzepts zu erklären.

Die von den Schülerinnen und Schülern erwartete Knotenregel bestätigt sich durch Messungen:

- Was in einen Knoten hineinfließt, fließt auch wieder heraus.
- Für die Parallelschaltung finden wir:  $I_1 = I_2 + I_3 = I_4$ ,  $U_B = U_1 = U_2$ ,  $R_G < R_1$ ,  $R_G < R_2$

### 3.4.3. Analogie Wasserstromkreis

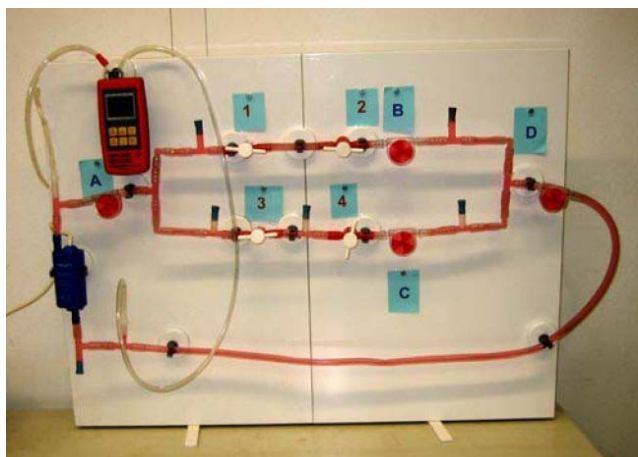


Abb. 3: Ein Wasserstromkreis

Die Regeln für elektrische Stromkreise finden ihre überaus anschauliche Analogie im Wasserstromkreis.

- Anhand von Druckmessungen erkennen wir, dass das Wasser von Stellen hohen Drucks zu Stellen tiefen Drucks fließt.
- Die Pumpe befördert das Wasser wieder von tiefem zu hohem Druck.
- An den Verzweigungen teilt sich der Wasserstrom. Die Wasserrädchen lassen deutlich die unterschiedlichen Stromstärken erkennen. Nach dem Zusammenfluss der beiden Zweige dreht sich das „Amperemeter“ wieder so schnell wie zuvor.

- Für die Serienschaltung gilt:  $\Delta p_{ges} = \Delta p_1 + \Delta p_2$ ,  $I_1 = I_2 = I_3$
- Für die Parallelschaltung gilt:  $\Delta p_{ges} = \Delta p_1 = \Delta p_2$ ,  $I_{ges} = I_1 + I_2$
- Durch Drehen an den Hähnen lassen sich verschiedene Widerstände einstellen. Die Beobachtungen bestätigen die Erwartungen.

### 3.4.4. Mechanische Stromkreise



Abb. 4: Ein Impulsstromkreis

Bei einer traditionellen Darstellung der Mechanik wird man in der oben abgebildeten Anordnung kaum einen mechanischen Stromkreis erkennen. Dass im Expander und der Stange Impuls fließt, sehen wir aber daran, dass sie unter Zug, bzw. Druck stehen. Auf die Frage in welche Richtung der Impuls strömt, gehen wir in der Aufgabe M2 ein.

Der abgebildete Stromkreis enthält aber noch eine weitere Besonderheit: In dem Stromkreis ist weder Antrieb noch Pumpe erkennbar. Tatsächlich existieren in der Mechanik offenbar auch Stromkreise ohne Antrieb. Ein Anwendungsgebiet für Impulsstromkreise ohne Antrieb ist die Statik. In der Baustatik ist es sogar üblich mit Impulsströmen zu rechnen, allerdings werden sie in diesem Zusammenhang meist als Lastströme bezeichnet.

Ströme ohne Antrieb und Pumpe kennen wir auch von Strömen in Supraleitern aus der Elektrizitätslehre.



Abb. 5: Knotenregel für Impuls in einer Dimension

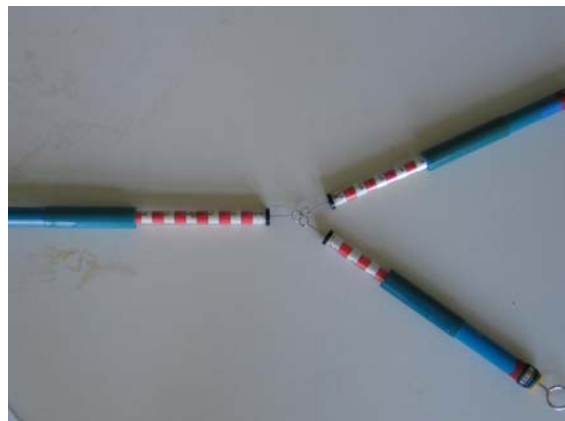


Abb. 6: Knotenregel für Impuls in zwei Dimensionen

Auch die Knotenregel können die Schülerinnen und Schüler in der Mechanik wieder entdecken. Seltsamerweise gilt der erwartete Zusammenhang  $F = F_1 + F_2$  nur bei linearen Anordnungen.

Bei mehrdimensionalen Anordnungen sind die Impulsstromstärken vektoriell zu addieren:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$



Abb. 7: Impulsstromkreis mit Impulspumpe

Neben den Impulsstromkreisen ohne Antrieb gibt es, wie das nebenstehende Bild zeigt, auch Impulsstromkreise mit Antrieb. Auch wenn der Weg, den der Impuls nimmt, nicht gleich offensichtlich ist, sollten die Schülerinnen und Schüler doch in der Lage sein, alle Merkmale eines typischen Stromkreises zu identifizieren (vergleiche Aufgabe M4).

### 3.4.5. Stromkreise in der Wärmelehre?

Sie spielen in der Praxis wohl nicht die Rolle wie in der Elektrizitätslehre. Der Vollständigkeit halber sei auf die Aufgabe W4 „Heizung ist nicht gleich Heizung“ verwiesen. Die Entropie fließt von hoher Temperatur im Zimmer zu tiefer Temperatur nach draußen. Die Wärmepumpe pumpt die Entropie wieder von draußen nach drinnen.

## 3.5. Transporte

### 3.5.1. Wärmeleitung und Konvektion

Üblicherweise unterscheidet man in der Wärmelehre zwei unterschiedliche Typen von Wärme- bzw. Entropietransporten: Wärmeleitung und Konvektion. Beide kommen in unserer Umwelt in großer Zahl vor.

Konvektive Entropietransporte: Golfstrom, warme Winde, Warmwasserleitung,...

Wärmeleitung: Entropie, die durch die Hauswand aus dem Zimmer nach draußen strömt; Entropie, die aus dem Brennerraum durch die Kesselwand in den Kessel strömt; Entropie, die aus der Herdplatte durch den Boden des Topfes in die Suppe strömt;...

Die wesentlichen Unterschiede zwischen beiden Typen werden aus den Beispielen deutlich.

Bei Konvektion wird die Entropie im Huckepackverfahren von warmem Wasser, warmer Luft oder Licht mitgenommen. Dabei ist kein Temperaturunterschied notwendig, und die Entropie kann über große Strecken transportiert werden.

Bei der Wärmeleitung fließt nur die Entropie durch die Leitung. Das funktioniert nur mit einem Temperaturunterschied und über kurze Strecken.

Beachte: den Entropietransport mit dem Träger Licht haben wir hier als konvektiven Transport verbucht. In der Literatur wird unter der Bezeichnung Wärmestrahlung mitunter noch ein drittes Fass aufgemacht.

### 3.5.2. Gibt es dazu Analogien in den anderen Teilgebieten?

Man wird möglicherweise erwarten, dass diese Einteilung der Transporte auch in den anderen Teilgebieten sinnvoll ist.

Tatsächlich ist die Einteilung in Konvektion und Leitung aber problematisch und keineswegs in allen Fällen eindeutig möglich.

Zwar lassen sich viele Vorgänge recht eindeutig zuordnen, etwa ein fliegender Ball als konvektiver Impulstransport, der Impulsfluss durch ein gespanntes Seil als Leitung und der Elektronenstrahl in einer Braunschen Röhre als konvektiver Ladungstransport.

Andere Beispiele sind aber nicht so klar. Der gewöhnliche Strom in einem Kupferkabel ist auf den ersten Blick ebenfalls konvektiv, da er ja mit einem Elektronenfluss verbunden ist. Mit dem gleichen Argument kann man dann aber auch die Impulsleitung in einem gespannten Seil als Konvektion auffassen, da man sie auch als Phononentransport interpretieren kann.

## **3.6. Gleichgewichte**

### **3.6.1. Gleichgewichte in den Bildungsstandards**

In den Bildungsstandards werden beim Basiskonzept System explizit Gleichgewichte genannt, vgl. Abschnitt 1.2. Auch diese können im Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept sehr anschaulich dargestellt werden. Zum Abschluss des Kapitels wollen wir deshalb noch einmal kurz auf das Thema Gleichgewichte eingehen.

Man mache sich dazu zunächst klar, dass der Begriff Gleichgewicht in der Physik keine eindeutige Verwendung findet. Nachfolgend stellen wir zwei unterschiedliche Verwendungsweisen des Begriffs gegenüber.



### 3.6.2. Sobald der Antrieb verschwindet, befindet sich die Anordnung im Gleichgewicht



Abb. 1: Pneumatisches Gleichgewicht

$$\Delta p = 0 \text{ bar } (p_1 = p_2)$$

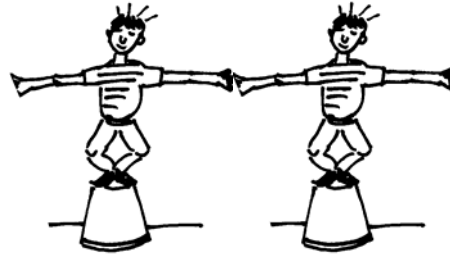


Abb. 2: Gleichgewicht in der Elektrizitätslehre

$$\Delta \varphi = 0 \text{ V } (\varphi_1 = \varphi_2)$$

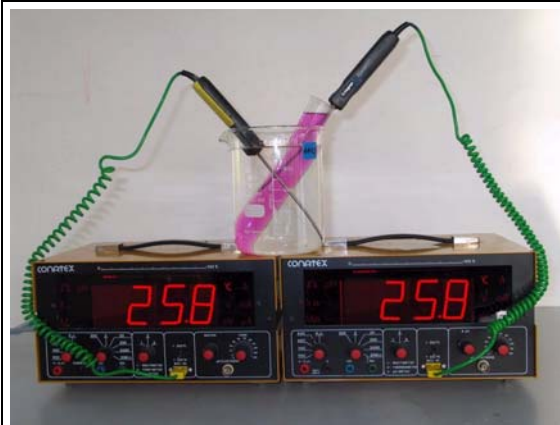


Abb. 3: Gleichgewicht in der Wärmelehre

$$\Delta T = 0 \text{ K } (T_1 = T_2)$$

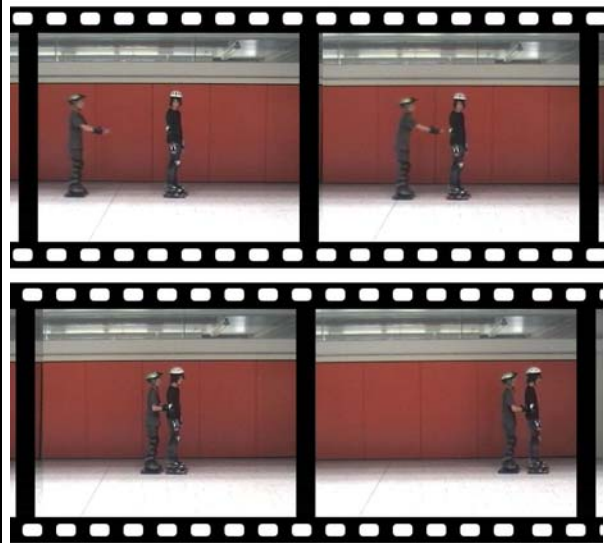


Abb. 4: Gleichgewicht in der Mechanik

$$\Delta v = 0 \text{ m/s } (v_1 = v_2)$$

Die Anordnung ist im Gleichgewicht, sobald der Antrieb verschwindet. Die Luft, die Ladung, die Entropie, der Impuls hört dann auf zu strömen.

### 3.6.3. Fließgleichgewichte

Bei Fließgleichgewichten handelt es sich um einen anderen Typ von Gleichgewicht. Anders als bei den oben besprochenen Gleichgewichten hört bei Fließgleichgewichten die jeweilige Größe nicht auf zu strömen. Ein Fließgleichgewicht ist dann erreicht, wenn in ein System genau so viel hinein wie hinaus fließt. Man spricht dann auch von einem stationären Zustand.



Abb. 5: Fließgleichgewicht bei Wasserströmen

*Beobachtung:* Zunächst nimmt die Wassermenge in der Flasche zu, stabilisiert sich dann aber bei einem bestimmten Füllstand.

*Erklärung:* Der Zustrom ist konstant, nicht aber der Abstrom. Der wächst mit zunehmendem Füllstand.

Fließgleichgewicht ist erreicht bei  $I_{\text{Wasserzufluss}} = I_{\text{Wasserabfluss}}$



Abb. 6: Fließgleichgewicht in der Mechanik

*Beobachtung:* Wenn Carolin konstant in die Pedale tritt, wird sie zunächst immer schneller, erreicht aber schließlich eine Grenzggeschwindigkeit.

*Erklärung:* Tritt Carolin konstant in die Pedale, dann pumpt sie einen konstanten Impulsstrom aus der Erde in das Fahrrad. Vor allem durch Luftreibung haben wir aber auch einen Abstrom des Impulses, der mit zunehmender Geschwindigkeit zunimmt.

Fließgleichgewicht bei  $F_{\text{Zufluss}} = F_{\text{Abfluss}}$



Abb. 7: Fließgleichgewicht in der Wärmelehre

*Beobachtung:* Wenn wir ein Zimmer mit einem Elektroöfchen heizen, nimmt die Temperatur zunächst zu. Nach einiger Zeit wird das Zimmer aber nicht mehr wärmer.

*Erklärung:* Der Ofen liefert einen konstanten Entropiestrom in das Zimmer. Durch die Wände haben wir aber auch einen Abstrom der Entropie. Dieser Abstrom nimmt im Laufe der Zeit zu, denn der Unterschied zwischen Innen- und Außentemperatur (der Antrieb für den Entropiestrom durch die Hauswand) wird immer größer.

Fließgleichgewicht bei  $I_{S,\text{Zufluss}} = I_{S,\text{Abfluss}}$

In der Elektrizitätslehre werden die Schülerinnen und Schüler i. a. keine Alltagserfahrungen mit Fließgleichgewichten angeben können. Es ist aber nicht allzu schwierig, mit Hilfe von Analogieschlüssen ein passendes Experiment zu entwerfen:

| <i>Wasserströme</i>      | <i>Elektrische Ströme</i>   |
|--------------------------|---|
| Flasche                  | Kondensator   |
| Konstanter Zufluss       | Stromstabilisiertes Netzgerät   |
| Nicht konstanter Abfluss | Entladungsstrom über ohmschen Widerstand; hängt vom „Füllstand“ des Kondensators ab |

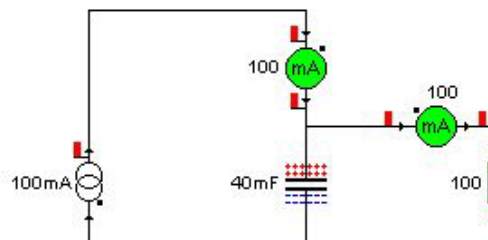


Abb. 8: Fließgleichgewicht in der Elektrizitätslehre

Fließgleichgewicht bei  $I_{\text{Zufluss}} = I_{\text{Abfluss}}$

## 4. Das Konzept im Unterrichtseinsatz – Ein Unterrichtsvorschlag zum Einstieg in die Elektrizitätslehre

An dieser Stelle soll ein möglicher Einstieg in die Elektrizitätslehre dargestellt werden, in dem die notwendigen Eckpunkte des Strom-Antriebs-Konzepts herausgestellt werden. Im tatsächlichen Unterricht können und sollen einzelne Teile natürlich ausgebaut und mit Alltagsbezug zur Technik versehen werden. Diesbezügliche Materialien finden sich aber in vielen Publikationen und sollen hier nicht wiederholt werden. Die dargestellten Teile sind so gewählt und formuliert, dass sie weitgehend von einer spezifischen Klassenstufe unabhängig sind.

### 4.1. Einstieg: Die elektrische Ladung

Will man die E-Lehre wie dargestellt analog zur Mechanik und Wärmelehre unterrichten, erscheint es angebracht, zuerst die Ladung als die mengenartige Größe einzuführen. Das heißt man sollte zumindest einen kleinen Teil der Elektrostatik vor der Elektrodynamik behandeln. Für den Einstieg bieten sich besonders Heimexperimente als vorbereitende Hausaufgabe an:

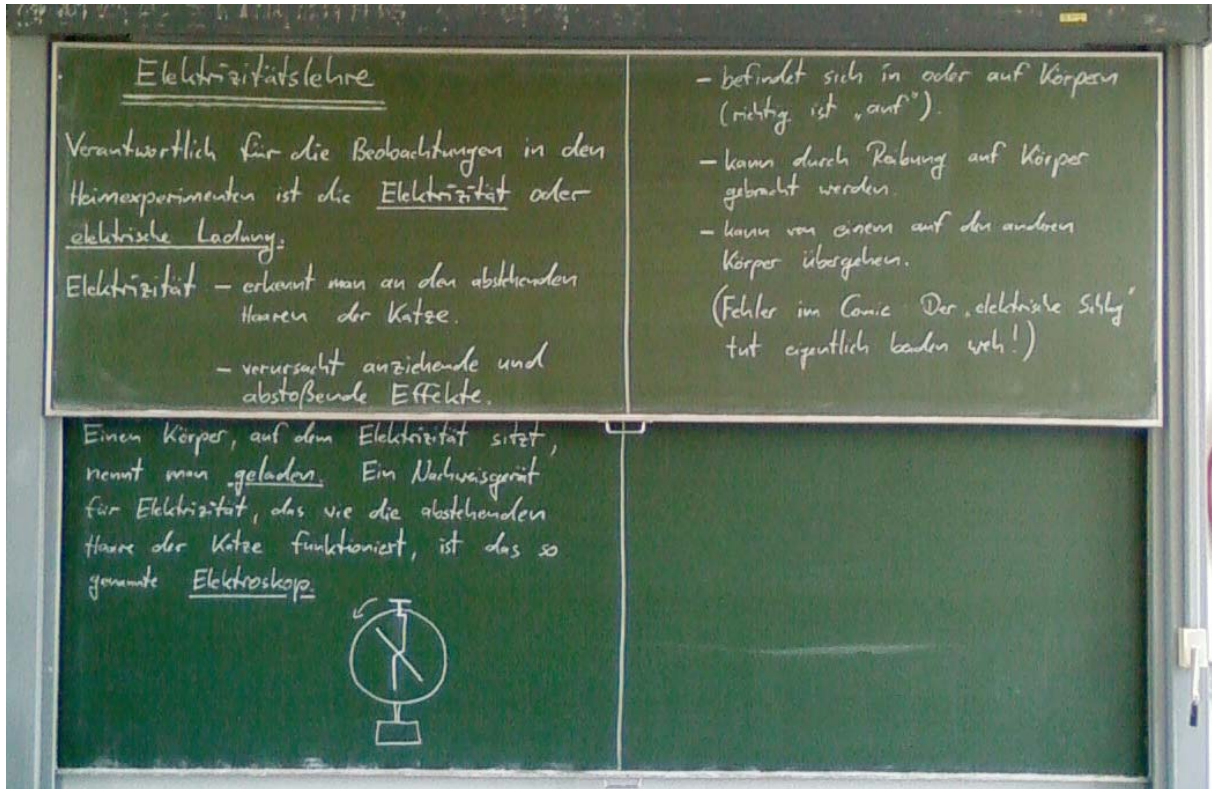
1. Plastiklöffel und Wasserstrahl: Reibe einen Plastiklöffel kräftig mit einem Wolltuch (oder einer Wollsocke). Drehe den Wasserhahn leicht auf, so dass ein dünner Wasserstrahl entsteht und bringe den Löffel nahe an den Wasserstrahl heran. Was kann man beobachten? Versuche die Beobachtung zu erklären. Was passiert, wenn der Wasserstrahl den Löffel trifft?
2. Luftballon und Konfetti: Blase einen Luftballon auf und reibe ihn kräftig mit einem Wolltuch (oder einem Wollpullover). Streue Konfetti (oder kleine Papierschnipsel) über dem Luftballon aus. Was kann man beobachten? Versuche die Beobachtung zu erklären. Was passiert, wenn man längere Zeit wartet?
3. Luftballon und Neonröhre: Blase einen Luftballon auf und reibe ihn kräftig mit einem Wolltuch (oder einem Wollpullover). Bringe die Kontakte einer kleinen Neonröhre mit dem Luftballon in Berührung. Was kann man beobachten? Versuche die Beobachtung zu erklären.
4. Zwei Luftballons: Blase zwei Luftballons auf und reibe sie kräftig mit einem Wolltuch (oder einem Wollpullover). Was kann man beobachten, wenn man die Luftballons einander annähert? Versuche die Beobachtung zu erklären.
5. Was könnte der Kater in den leeren Sprechblasen der beiden Comics gesagt haben? Versuche die Vorgänge zu erklären.



Bei der Besprechung dieser Arbeitsaufträge ist es wichtig, die Schülerinnen und Schüler genügend zu Wort kommen zu lassen, denn nur auf diese Weise kann man erfahren, welche Präkonzepte und Grundvorstellungen sie mitbringen. Deshalb sollten die Beschreibungen und Erklärungen der Experimente unbedingt verschriftlicht werden. Hierzu bieten sich Folien an, da die Schülerinnen und Schüler dann selbständig vor der Klasse ihre Ergebnisse präsentieren können. Bezüglich der Sprache sollte man die Mengenartigkeit in den Vordergrund stellen,

das heißt man sollte Formulierungen verwenden wie „steckt drin“, „viel“, „wenig“, „Elektrizität geht von A nach B“, ...

Insgesamt sollte die Besprechung genügend Material liefern, um die Einführung einer neuen physikalischen Größe zu motivieren und erste Eigenschaften zu notieren:



Um die Erkenntnisse zu untermauern, können die Eigenschaften dann noch mit den üblichen Demonstrationsversuchen der Elektrostatik bestätigt werden. Um zu zeigen, dass die elektrische Ladung negative und positive Werte annehmen kann, bieten sich mehrere Versuche an:

1. Versuch: Die geladenen Konduktorkugeln einer Influenzmaschine werden verbunden.  
Beobachtung: Beide Kugeln sind danach ungeladen.
2. Versuch: Man reibt einen Kunststoffstab mit einem Katzenfell und berührt das Elektroskop. Anschließend reibt man einen Glasstab mit einem Seidentuch und berührt wieder das Elektroskop.  
Beobachtung: Zuerst schlägt das Elektroskop aus, dann geht der Ausschlag wieder zurück.
3. Versuch: Man berührt mit zwei gleichen Konduktorkugeln den Pluspol beziehungsweise Minuspol eines Hochspannungsnetzgerätes. Anschließend bringt man die Kugeln zusammen.  
Beobachtung: Einzeln sind die Kugeln geladen. Nachdem sie verbunden wurden, sind sie ungeladen.

Die Erklärung für jeden Versuch ist, dass die Ladungssumme jeweils 0 Coulomb ist. Als weitere Eigenschaften der elektrischen Ladung hält man fest:

Die Elektrizität (elektrische Ladung) kann positive und negative Werte annehmen.  
Die elektrische Ladung ist eine Erhaltungsgröße, sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Wenn die Elektrizitätslehre spät in der Mittelstufe unterrichtet wird, kennen die Schülerinnen und Schüler bereits einige Teilgebiete der Physik und es bietet sich folgender Arbeitsauftrag (eventuell als Hausaufgabe) an:

*Auftrag:* Wichtige Größen beim Einstieg in die Mechanik waren Impuls und Geschwindigkeit. Die Wärmelehre begann mit Temperatur und Entropie. Wiederhole die Eigenschaften dieser Größen und suche Ähnlichkeiten und Unterschiede zur elektrischen Ladung.

Die Besprechung dieses Arbeitsauftrags sollte die Analogie zwischen Ladung, Impuls und Entropie zu Tage fördern. Spätestens jetzt ist es an der Zeit, für die neue Größe ein Symbol und eine Einheit einzuführen. Um den Aufbau eines physikalischen „Grundwortschatzes“ zu ermöglichen, hat es sich bewährt, neue Größen in tabellarischer Form aufzuschreiben und so eine „Größentabelle“ zu entwickeln, die im Laufe der Mittelstufe immer weiter wächst.

| Name                              | Symbol | Einheit          | Formel | Messgerät                          |
|-----------------------------------|--------|------------------|--------|------------------------------------|
| Elektrizität<br>(=elektr. Ladung) | $Q$    | 1 C<br>(Coulomb) | ---    | Messverstärker<br>(„Coulombmeter“) |

An dieser Stelle sollte man auch einige Ladungsmessungen durchführen und gegebenenfalls einige Stützwerte notieren, damit die Schülerinnen und Schüler einen Eindruck bekommen, wie groß (oder besser klein) die hier auftretenden Ladungen sind.

## 4.2. Wie viel Elektrizität befindet sich auf einem Körper?

Da die intensiven Größen Temperatur und Geschwindigkeit den Schülerinnen und Schülern vertraut sind, war deren Begriffsbildung in den Gebieten Mechanik und Wärmelehre keine didaktische Herausforderung. Das elektrische Potenzial stellt eine größere Hürde dar. Daher bietet es sich an, dieses als Analogiegröße einzuführen. Wenn die Elektrizitätslehre vor der Mechanik und der Wärmelehre unterrichtet wird, greift man ausschließlich auf die Analogie zur Luftmenge in einem Reifen zurück. Im anderen Fall ist es überlegenswert, das konkrete stoffliche Modell sogar außen vor zu lassen, um nach und nach eine größere Abstraktion des Modells zu erzielen.

*Auftrag:* Krame in deinen Unterlagen oder in deinem Gedächtnis und beantworte die beiden Fragen:

- Wovon hängt es ab, wie viel Impuls in einem Körper steckt?
- Wovon hängt es ab, wie viel Entropie in einem Körper steckt?

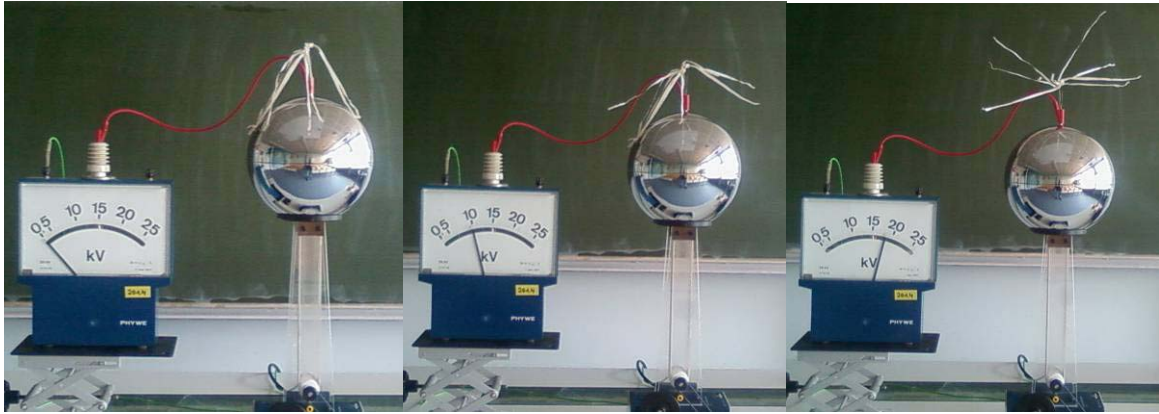
Danach wollen wir untersuchen, wie diese Frage für die Elektrizität zu beantworten ist.

Die Besprechung dieses Auftrags sollte die bekannten Regeln zu Tage fördern:

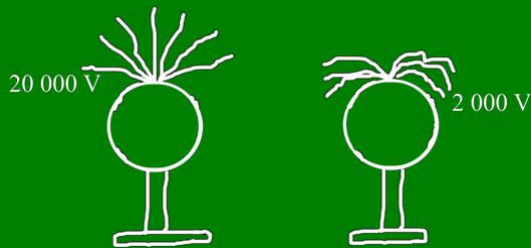
|  |  |
|--|--|
| Ein Körper enthält umso mehr Entropie,<br>– je größer er ist<br>– je höher seine Temperatur ist. | Ein Körper enthält umso mehr Impuls,<br>– je schwerer er ist<br>– je größer seine Geschwindigkeit ist. |
|--|--|

Die Schülerinnen und Schüler vermuten dann meist schon, dass auch bei der Elektrizität neben der Größe des Körpers eine weitere physikalische Größe eine Rolle spielt. Man kann dann identische Konduktorkugeln mit aufgesteckten Papierbüscheln am Bandgenerator mit angeschlossenem statischem Voltmeter aufladen und die Potenziale messen.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> siehe Aufgabe E1 in Abschnitt 6.2



### Wie viel Elektrizität befindet sich auf einem Körper?



Die Größe, die dafür sorgt, dass die linke Konduktorkugel mehr Ladung trägt als die rechte wird in der Einheit Volt gemessen. Die Größe heißt das **elektrische Potenzial**. Das elektrische Potenzial spielt in der Elektrizitätslehre die gleiche Rolle wie die Geschwindigkeit in der Mechanik und die Temperatur in der Wärmelehre.

| Name                    | Symbol    | Einheit      | Formel | Messgerät |
|-------------------------|-----------|--------------|--------|-----------|
| Potenzial<br>(Voltzahl) | $\varphi$ | 1V<br>(Volt) | ---    | Voltmeter |

Das Potenzial kann positive und negative Werte annehmen. (Den Nullpunkt kann man festlegen und sagt: Das Potenzial der Erde beträgt 0V.  $\varphi_{\text{Erde}} = 0\text{V}$ )

Auf einem Körper befindet sich umso mehr Elektrizität,

- je größer er ist
- je höher das Potenzial ist, das auf ihm herrscht.

### 4.3. Elektrizität kann strömen

Schon in den Einstiegsbeispielen kommt üblicherweise zur Sprache, dass Elektrizität von einem auf den anderen Körper übergeht, also strömt. Da nun das elektrische Potenzial als Größe zur Verfügung steht, kann man darangehen, mit den Schülerinnen und Schülern die Ursache des Strömens zu untersuchen.

Versuch: Von zwei Konduktorkugeln mit aufgesteckten Papierbüscheln wird eine mit einem Bandgenerator aufgeladen, dann werden beide Kugeln leitend miteinander verbunden. Bei der zuvor geladenen Konduktorkugel stehen nun die Papierbüschel weniger ab, bei der anderen Konduktorkugel haben sich die Papierbüschel etwas aufgerichtet.

Hier wird meist direkt die Vermutung geäußert, dass die Elektrizität von der einen auf die andere Kugel strömt. Um dies zu unterstreichen, sollte man den gleichen Versuch noch einmal durchführen, wobei die leitende Verbindung zusätzlich ein Glimmlämpchen enthält. Das Leuchten festigt die Vorstellung, dass hier Elektrizität von einer auf die andere Kugel übergeht. Nun stellt sich die Frage, warum und wie viel, beziehungsweise wie lange die Elektrizität denn strömt.

Dazu wird der gleiche Versuch noch einmal durchgeführt, wobei dieses Mal vorher und nachher die Potenziale gemessen werden. Man misst vorher unterschiedliche Potenziale und nach dem Aufleuchten die gleichen Potenziale. Wenn man danach die Schülerinnen und Schüler Vermutungen und Erklärungen zu dem Experiment äußern lässt, können verschiedene Fehlvorstellungen zu Tage treten:

- Die Elektrizität strömt so lange, bis beide gleich viel Ladung tragen.
- Das Potenzial strömt von einer Kugel in die andere.
- Sonstige unerwartete Fehlvorstellungen.

Der ersten Vermutung kann man entgegentreten, indem man die Konduktorkugeln unterschiedlich groß wählt, denn dann trägt am Ende des Experiments die größere Kugel mehr Ladung. Der zweiten Fehlvorstellung ist schwieriger zu begegnen. Hier kann man durch entsprechende Experimente nur verdeutlichen, dass das Potenzial keine mengenartige Größe ist, die sich auf Körper verteilt und darum auch nicht zu der Vorstellung „Strömen“ passt.

Mögliche Experimente sind etwa:

Man lädt zwei verbundene Konduktorkugeln und misst das Potenzial. Dann trennt man die Kugeln und stellt fest, dass man bei beiden noch das gleiche Potenzial messen kann. Also hat sich das Potenzial nicht auf beide Kugeln verteilt. Führt man das Experiment umgekehrt durch, so sieht man, dass sich das Potenzial nicht additiv verhält und darum keine mengenartige Größe sein kann.

Insgesamt sollte die Besprechung der Versuche in die folgende Regel münden:

Elektrizität strömt von selbst von Stellen hohen Potenzials zu Stellen tiefen Potenzials, so lange bis der Potenzialunterschied gleich null ist.  
Der Potenzialunterschied (=Spannung) ist ein Antrieb für einen Elektrizitätsstrom.

Für die Spannung kann man dann einen eigenen Eintrag in der Größentabelle machen:

| <i>Name</i>                        | <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Formel</i>               | <i>Messgerät</i> |
|------------------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|------------------|
| Spannung<br>(Potenzialunterschied) | $U$           | 1V<br>(Volt)   | $U = \varphi_1 - \varphi_2$ | Voltmeter        |

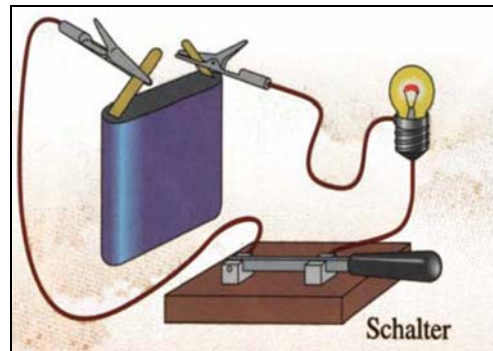
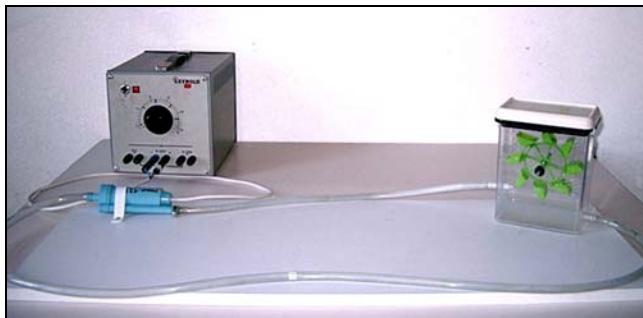
#### 4.4. Der elektrische Stromkreis

Hier bietet es sich an, die Analogien zwischen Wasserstromkreisen und elektrischen Stromkreisen von den Schülerinnen und Schülern in Partner- oder Gruppenarbeit entdecken zu lassen. Ein Arbeitsblatt kann wie folgt aussehen:

Wenn der Becher leer ist, bleibt das Wasserrad stehen. Um das Rad in Bewegung zu halten, muss man das Wasser mit einer Pumpe in einem Kreislauf antreiben. Ähnlich verhält es sich mit der Elektrizität, wenn wir ein Lämpchen kontinuierlich zum Leuchten bringen wollen.



Beschreibe die Funktion der Bauteile im Wasserstromkreis und ordne den Bauteilen im Wasserstromkreis die entsprechenden Bauteile im elektrischen Stromkreis zu.



| Wasserstromkreis |          | elektrischer Stromkreis |          |
|------------------|----------|-------------------------|----------|
| Bauteil          | Funktion | Bauteil                 | Funktion |
| Schlauch         |          |                         |          |
| Wasserrad        |          |                         |          |
| Absperrventil    |          |                         |          |
| Pumpe            |          |                         |          |
| Wasser           |          |                         |          |

Zusätzliche Fragen:

1. Welche physikalische Größe ist jeweils verantwortlich für den Antrieb.
2. Was passiert, wenn man das Absperrventil hinter dem Wasserrad einbaut?
3. Warum hat jedes Bauteil zwei Anschlüsse?
4. Wird im Wasserstromkreis Wasser verbraucht? Wie sieht das beim elektrischen Stromkreis aus?
5. Vergleiche die Redensarten „es fließt Strom“ und „der Wind weht“. Was macht der Wind, wenn er nicht weht?



### 4.5. Die elektrische Stromstärke

Hier bietet sich zum Einstieg eine Wiederholung bekannter Stromstärken in Form eines Arbeitsblatts an:

| <i>Name</i>                             | <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i> | <i>Formel</i> | <i>Messgerät</i> |
|---|---------------|----------------|---------------|------------------|
| Verkehrsstromstärke<br>$I_{Auto}$       |               |                |               |                  |
| Wasserstromstärke<br>$I_{Wasser}$       |               |                |               |                  |
| Energiestromstärke<br>$I_{Energie} (P)$ |               |                |               |                  |
| Impulsstromstärke<br>$I_{Impuls} (F)$   |               |                |               |                  |
| Entropiestromstärke<br>$I_{Entropie}$   |               |                |               |                  |

Die Besprechung der Tabelle führt zu folgendem Grundprinzip:

#### Die elektrische Stromstärke

Stromstärken werden immer nach dem gleichen Muster gebildet:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Menge der vorbeiströmenden Größe}}{\text{Zeit}}$$

Genau so verhält es sich in der Elektrizitätslehre. Die elektrische Stromstärke ist die Menge an durchfließender Ladung pro Zeit.

$$I = \frac{Q}{t}$$

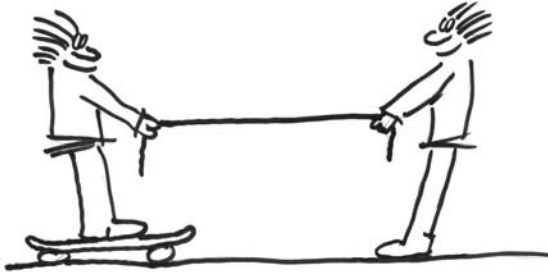
Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist dann  $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Sekunde}}$ . Dafür gibt es einen eigenen Namen und zwar Ampere.

| <i>Name</i>             | <i>Symbol</i> | <i>Einheit</i>  | <i>Formel</i>     | <i>Messgerät</i> |
|-------------------------|---------------|---|-------------------|------------------|
| elektrische Stromstärke | $I$           | $1\text{A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}$<br>(Ampere) | $I = \frac{Q}{t}$ | Amperemeter      |

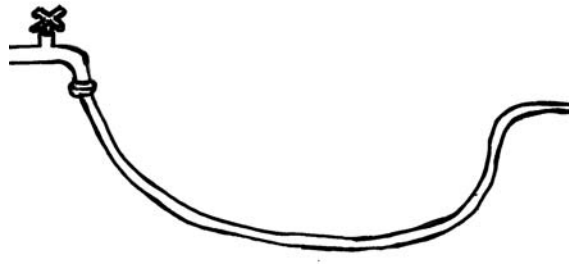
## 4.6. Die Messung der elektrischen Stromstärke

Arbeitsaufträge:

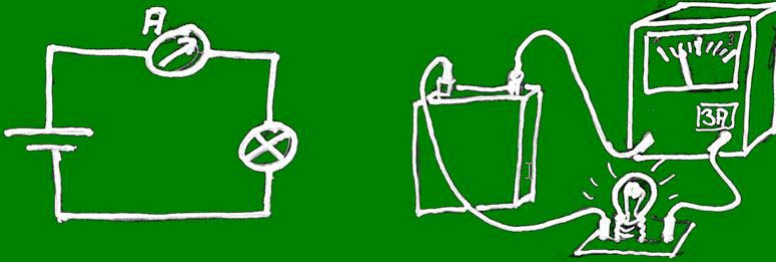
Wie kann man die Impulsstromstärke in dem Seil messen?



Wie kann man die Wasserstromstärke in dem Schlauch messen?



Zum Messen der Impulsstromstärke und zum Messen der Wasserstromstärke muss man die Leitung auftrennen und das Messgerät in die Leitung schalten. Genauso verhält es sich bei der elektrischen Stromstärke.



An dieser Stelle sollten die Schülerinnen und Schüler genügend präpariert sein, um im Schülerpraktikum weitere Zusammenhänge zu erkunden:<sup>15</sup>

<sup>15</sup> siehe Aufgaben E6 bis E8 in Abschnitt 6.2

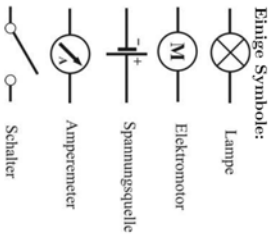
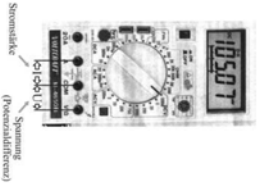
Name: ..... Partner: .....

Farbcode des Kastens: .....

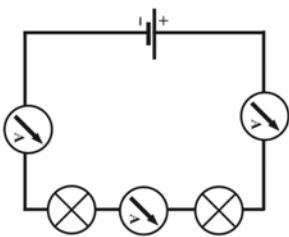
Multimetersterriff: .....

**Wichtige Hinweise für das Praktikum:**

- Die Experimente werden in Partnerarbeit durchgeführt (Dreiergruppen sind nur im Notfall zugelassen)
- Es wird jedes Mal der gleiche Kasten verwendet (Farbcodes beachten)
- Vor Beginn und nach Ende den Kasten auf Vollständigkeit überprüfen (auch hier sind die Farbcodes wichtig) und fehlende, defekte oder überzählige Bauteile sofort melden
- Spannungsquelle sind die Buchsen 1 und 3 an den Seiten der Tische
- Vorsichtiger Umgang mit den Bauteilen: die Stabilität lässt zu wünschen übrig!
- Schonen der Batterien: nach den Messungen Messgeräte ausschalten
- Vor dem Umschalten eines Messgerätes das Gerät aus der Schaltung nehmen
- Am Ende die Multimeter auf den Bereich 20V = schalten
- Auf die richtige Buchsenbelegung des Multimeters achten

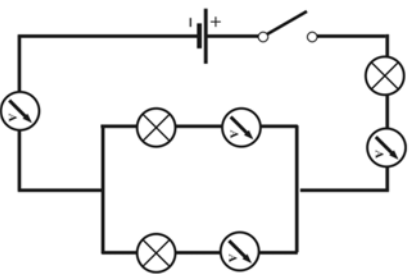


**1 Messung der elektrischen Stromstärke**



1. Baue die Schaltung mit zwei Lämpchen auf.
2. Bestimme die Stromstärken an den drei gekennzeichneten Stellen.  
 $I_1 =$        $I_2 =$        $I_3 =$
3. Wie muss ein Amperemeter geschaltet werden?
4. Verbrauchen die Lämpchen Strom?

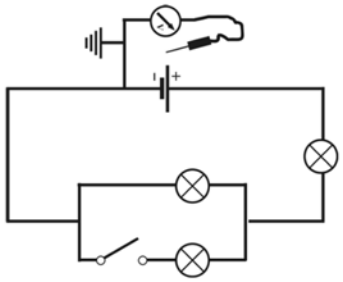
**2 Die Knotenregel**



1. Baue die nebenstehende Schaltung auf.
2. Bestimme die Stromstärken an den vier gekennzeichneten Stellen.  
 $I_1 =$        $I_2 =$        $I_3 =$        $I_4 =$
3. Bestätigen die Messergebnisse die Knotenregel?
4. Formuliere die Knotenregel verbatim!

Zusatzaufgabe: Wie sieht es mit der Knotenregel bei Wasserströmen, Impulsströmen und Entropieströmen aus?

### 3 Messung des elektrischen Potenzials



1. Baue die nebenstehende Schaltung auf.
2. Bestimme bei **geschlossenem** Schalter die Potenziale an den verschiedenen Stellen des Stromkreises. Zeichne Stellen gleichen Potenzials in gleicher Farbe.

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 =$$

3. Bestimme bei **geschlossenem** Schalter die Spannungen an der Quelle und an den drei Lämpchen.

$$U_Q = \quad U_1 = \quad U_2 = \quad U_3 =$$

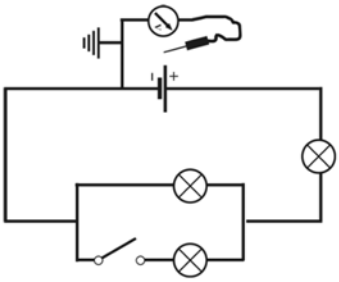
4. Bestimme bei **offenem** Schalter die Potenziale an den verschiedenen Stellen des Stromkreises. Zeichne Stellen gleichen Potenzials in gleicher Farbe.

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 = \quad \varphi_4 =$$

5. Bestimme bei **offenem** Schalter die Spannungen an der Quelle und an den drei Lämpchen.

$$U_Q = \quad U_1 = \quad U_2 = \quad U_3 =$$

6. Wie muss ein Voltmeter geschaltet werden?

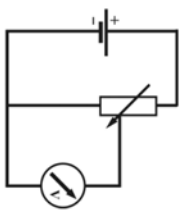


Ein Multimeter misst normalerweise Spannungen, also Potenzialdifferenzen. Damit man Potenziale messen kann, braucht das Multimeter einen Bezugspunkt. Deshalb wird die Schaltung an der angegebenen Stelle geändert.

Warum leuchtet bei geöffnetem Schalter das eine Lämpchen nicht?

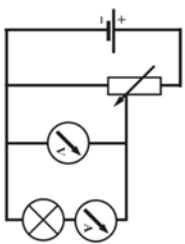
### 4 Stromstärke: Antrieb und Widerstand

#### 4.1 Eine regelbare Spannungsquelle



1. Baue die nebenstehende Schaltung auf. Das neue Bauteil ist ein sogenanntes Potenziometer.
  2. Prüfe nach, dass du mit dem Potenziometer tatsächlich verschiedene Spannungen an der gekennzeichneten Stelle einstellen kannst.
- Diese regelbare Spannungsquelle wird für die nächste Schaltung benötigt.

#### 4.2 Stromstärke und Antrieb



1. Erweitere die Schaltung von eben durch eine Lampe und ein Amperemeter.
  2. Stelle mit dem Potenziometer verschiedene Spannungen ein und miss die jeweilige Stromstärke.
- |         |  |  |  |  |  |
|---------|--|--|--|--|--|
| U in V  |  |  |  |  |  |
| I in mA |  |  |  |  |  |

#### 4.3 Stromstärke und Widerstand

1. Benutze die Schaltung von eben aber mit einer fest gewählten Spannung.
2. Setze verschiedene Lämpchen ein (3 oder 4) und miss die jeweilige Stromstärke bei der gleichen Spannung.
3. Warum sind die gemessenen Stromstärken verschieden?

|         |   |   |   |   |
|---------|---|---|---|---|
| Lampe   | 1 | 2 | 3 | 4 |
| I in mA |   |   |   |   |

benutzte Spannung:  $U =$

Fasse die Ergebnisse der letzten beiden Messreihen zu einer Regel zusammen:

Die Stromstärke durch das Lämpchen ist um so größer

- 
-

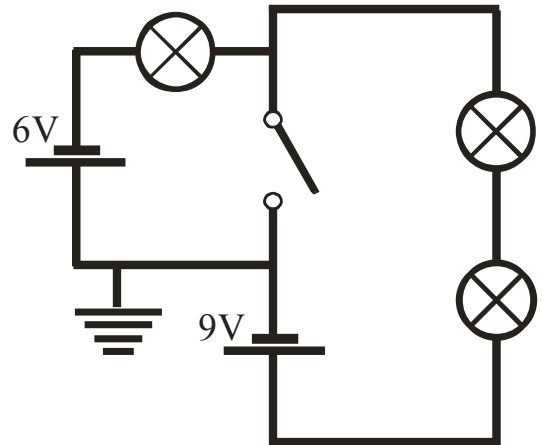
## 4.7. Elektrotechnische Probleme

Das im dritten Teil des Schülerpraktikums entwickelte Verfahren, Leitungsabschnitte gleichen Potentials mit der gleichen Farbe einzufärben, ist ein mächtiges Hilfsmittel, um Schaltungen zu analysieren.<sup>16</sup> Die Schülerinnen und Schüler sind erfahrungsgemäß in der Lage, relativ leicht auch schwierige Probleme, wie etwa das folgende zu lösen:

In der nebenstehenden Schaltung sind alle Lampen baugleich.

Aufgaben:

- Kennzeichne Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe.
- Bestimme die Potenziale.
- Wie leuchten die Lampen?
- Zeichne die Schaltung mit geschlossenem Schalter und bestimme die Potenziale.
- Was kann man beim Schließen des Schalters beobachten?



Die drei Lampen hängen in Reihe und sind baugleich, also teilt sich der gesamte Antrieb von  $9\text{V} - 6\text{V} = 15\text{V}$  gleichmäßig auf die drei Lampen auf.

Die zwei rechten Lampen haben nun jeweils einen Antrieb von  $4,5\text{V}$  und die linke Lampe einen Antrieb von  $6\text{V}$ . Beim Schließen des Schalters wird also die linke Lampe etwas heller und die beiden rechten etwas dunkler.

<sup>16</sup> siehe Aufgaben E2 bis E5 in Abschnitt 6.2

## 5. Konzepte im Unterrichtseinsatz – Zwei weitere Unterrichtsbeispiele zum Strom-Antriebs-Konzept

Die Forderung der Bildungsstandards, inhaltliches Fachwissen durch Basiskonzepte abzubilden, muss nicht notwendig eine höhere Unterrichtsbelastung und einen größeren Zeitaufwand bedeuten. Ganz im Gegenteil können solche Konzepte genutzt werden, um durch die Ausnutzung von Analogien ein neues physikalisches Gebiet schnell kennen zu lernen.

Die zwei Unterrichtsbeispiele sollen verdeutlichen, wie tragfähig das Strom-Antriebs-Konzept in verschiedenen Klassenstufen ist und wie es kumulativ von den Schülerinnen und Schülern adaptiert wird. Zudem soll eine Möglichkeit zum konstruktiven und schülerzentrierten Umgang mit typischen Fehlern und Fehlinterpretationen dargestellt werden.

### 5.1. Beispiel aus Klasse 8 – Mechanik

Das Fach Physik in Klasse 8 startete in dieser Klasse mit einführenden Kapiteln über Energietransporte und Luftströmungen. Beim Einstieg in die Mechanik lag der Schwerpunkt auf dynamischen Vorgängen, das heißt einer Begriffsbildung der Größe „Impuls“. Bei Bewegungsvorgängen wurden Fragestellungen untersucht wie „Woher kommt der Impuls?“ oder „Wohin geht der Impuls?“, die Klasse untersuchte Bewegungen mit Reibung, Antriebe und Bremsen,... In der vorliegenden Stunde sollte die Frage geklärt werden „Welche Richtung haben Impulsströme?“ bzw. „Was treibt Impulsströme an?“

In einer der Physikstunden zu Luft- und Wasserströmen hatten die Schülerinnen und Schüler das Strom-Antriebs-Konzept bereits kennen gelernt<sup>17</sup>. Um die Stunde zeitlich zu entlasten, wurde die Beschreibung des entsprechenden Experiments als vorbereitende Hausaufgabe ausgelagert. Wie in dieser Klasse üblich wurde von einem Schüler die Hausaufgabe auf Folie bearbeitet. Dies ermöglicht ohne großen Aufwand eine schülerzentrierte Besprechung der Hausaufgabe. Seine Lösung sah wie folgt aus:

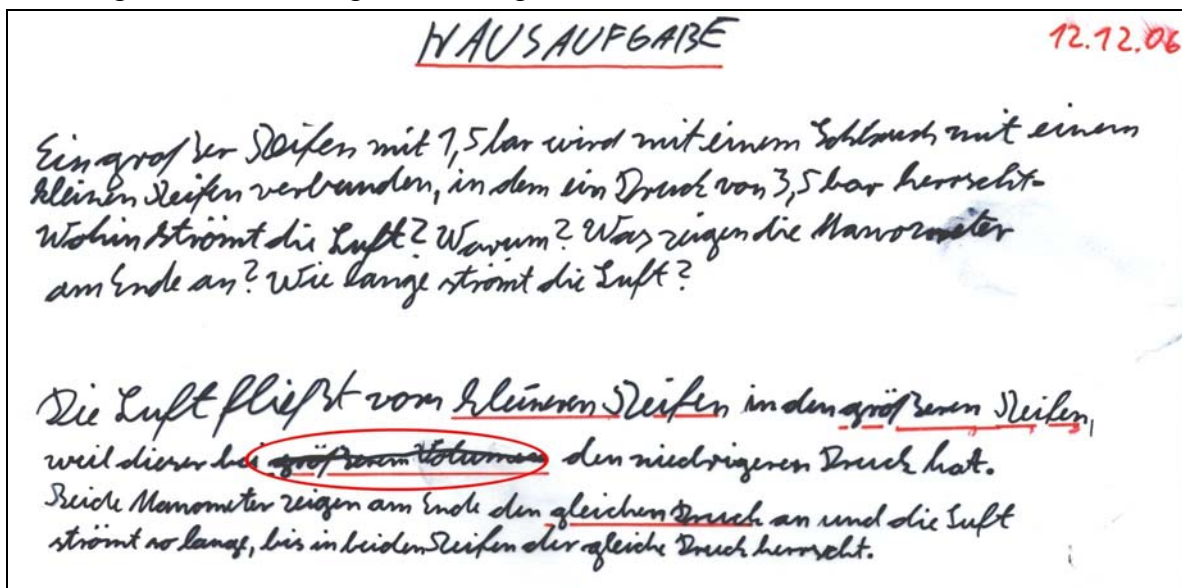


Abb. 1: vorbereitende Hausaufgabe (Schülerlösung)

Er unterstützte das noch durch eine Skizze:

<sup>17</sup> natürlich nur in der Sache und nicht unter diesem Namen

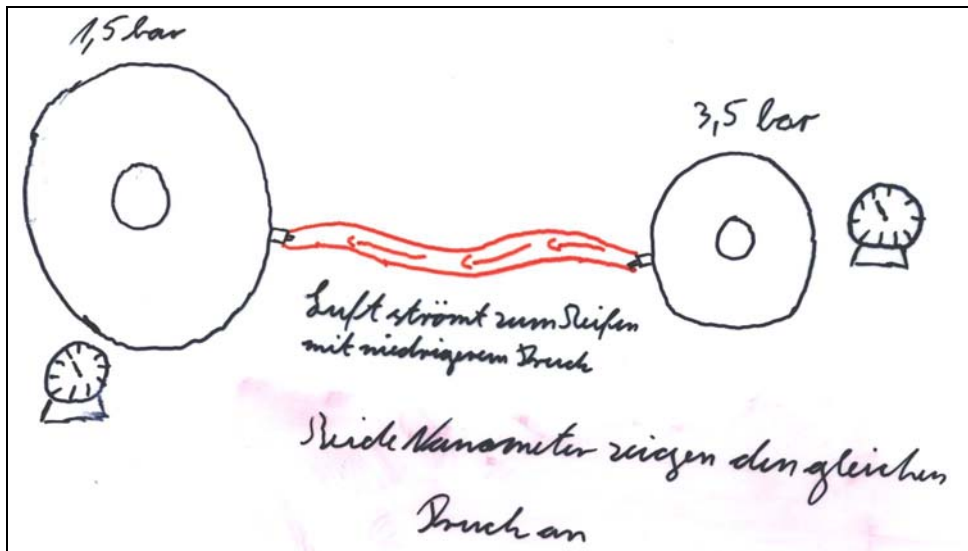


Abb. 2: Schülerskizze zur Hausaufgabe

In der Besprechung wurde von den Schülerinnen und Schülern die markierte Stelle diskutiert und schließlich als falsch verworfen und durchgestrichen. Die aus diesem Experiment gewonnene Einsicht wurde noch zusätzlich an der Tafel notiert, um für den Rest der Stunde sichtbar zu sein.

Die Luft strömt (von selbst) vom Reifen mit hohem Druck zum Reifen mit niedrigem Druck und zwar so lange, bis in beiden Reifen der gleiche Druck herrscht.

Dies motivierte die Fragestellung wie sich das bei Impulsströmen verhält. Dazu wurden die folgenden Experimente durchgeführt:

1. „Die Skater“: Ein schneller Skater fährt auf einen langsamen auf. Nach dem Zusammenstoß fahren beide mit der gleichen Geschwindigkeit weiter. Mit Inline-Skatern ist dieses Experiment leichter durchführbar, aber Skateboards muss man nicht umständlich an- und ausziehen.

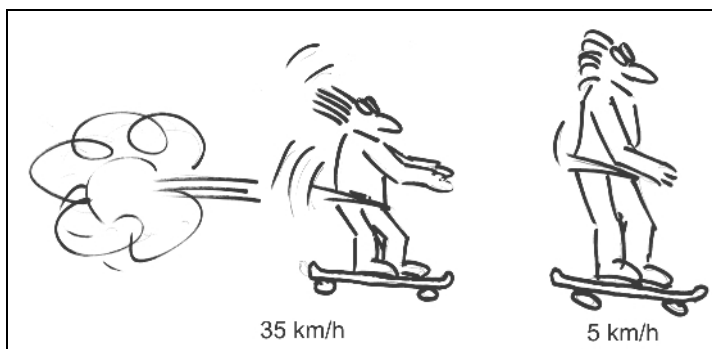


Abb. 3: Experiment 1 zum Strom-Antriebs-Konzept in der Mechanik

2. „Buch und Brett“: Ein Buch wird auf ein Brett geworfen, das auf Rollen gelagert ist. Das Buch rutscht auf dem Brett entlang, bis sich Buch und Brett mit der gleichen Geschwindigkeit weiterbewegen. Man sollte vorher einige Male üben, um die passenden Geschwindigkeiten herauszufinden.

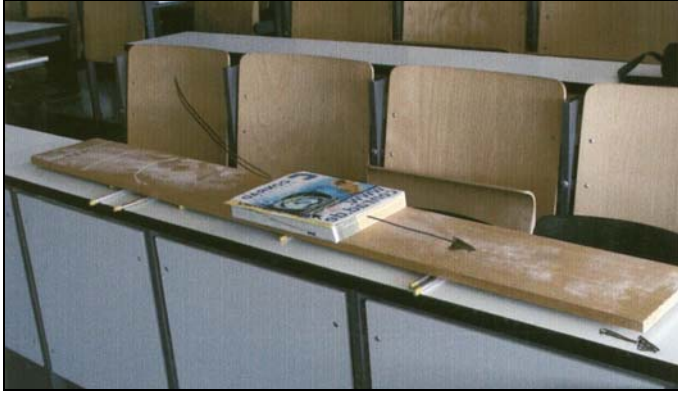


Abb. 4: Experiment 2 zum Strom-Antriebs-Konzept in der Mechanik

3. „Wagen auf der Fahrbahn“: Auf der Luftkissenfahrbahn stößt ein schneller Gleiter inelastisch gegen einen langsamen. Danach fahren beide mit der gleichen Geschwindigkeit weiter.

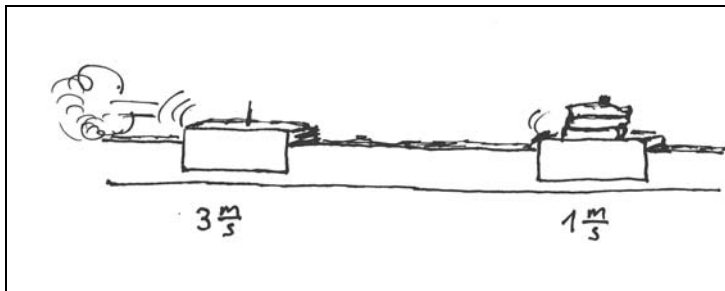


Abb. 5: Experiment 3 zum Strom-Antriebs-Konzept in der Mechanik

Es ist wichtig, alle Bewegungen zuerst nach rechts, die vereinbarte positive Bewegungsrichtung, zu orientieren. Ansonsten muss mit negativen Geschwindigkeiten operiert werden, was an dieser Stelle erfahrungsgemäß eine nicht zu unterschätzende Hürde ist. Zu jedem Experiment wurden nun die gleichen Leitfragen gestellt:

- Von wo nach wo strömt der Impuls?
- Wie lange strömt der Impuls?
- Was sind die Gemeinsamkeiten mit dem Reifenexperiment?


Diese Demoexperimente wären natürlich auch als Schülerexperimente denkbar, es ist aber schwierig, bei diesem Thema Experimentieranleitungen so zu formulieren, dass einerseits klar ist, auf was man achten muss, aber andererseits das Ergebnis nicht vorweg genommen wird. Die Bearbeitung der Aufträge erfolgte in Gruppenarbeit, wobei jeweils nur eines der drei Experimente erklärt wurde. Die Ergebnisse wurden von den Schülerinnen und Schülern auf Folie gesichert. In dieser Phase ist es wichtig, den Schülerinnen und Schülern genügend Zeit zu lassen, verschiedene Hypothesen durchzudenken. Hilfen durch den Lehrer sollten nur im Notfall und so sparsam wie möglich gegeben werden. Bei den Diskussionen innerhalb der Gruppen lohnt es sich, genau zuzuhören, denn man erfährt viel über die physikalischen Grundvorstellungen der Schülerinnen und Schüler. Hier die Ergebnisse der Gruppen, die anschließend präsentierten:

Zuerst präsentierte eine der „Buch und Brett“-Gruppen mit der Folie aus der Abbildung. Die Zeile „Der Impuls strömt so lange, bis beide gleich viel Impuls haben“ ist durchaus ein typischer Schülerfehler, hier ist aber der Zusammenhang interessant, denn bei den Gemeinsamkeiten schreiben sie, dass sich der Impuls wie der Druck „verteilt“. Da gleichzeitig die Aussage „nur dass der Druck nicht strömt!“ mit einem Ausrufezeichen versehen ist, könnte man vermuten, dass diese Aussage ihren Grundvorstellungen zuwiderläuft. Hier besteht an einigen Stellen Klärungsbedarf. Bei der Präsentation stieß sofort der erste Satz auf einigen Widerspruch in der Klasse. Daraufhin wurden die Massen von Buch und Brett verglichen und alle



waren sich einig, dass am Ende in dem Brett mehr Impuls steckt. Die präsentierende Gruppe schrieb ein „F“ daneben und meinte, dass dann auch alles Weitere nicht mehr stimmen könnte.

Der Antrieb bei Impulsströmen — Buch und Brett



Beschreibe zuerst, was man beobachtet hat und beantworte dann die drei Leitfragen unten.

- Von wo nach wo strömt der Impuls?
- Wie lange strömt der Impuls?
- Was sind die Gemeinsamkeiten mit dem Reifenexperiment?

- Der Impuls strömt von dem Buch in das Brett. Das Buch hatte mehr Impuls und gibt dann Impuls an das Brett ab, so dass beide gleich viel Impuls haben.


- Der Impuls strömt solange, bis beide gleich viel Impuls haben.

- Der Impuls verteilt sich wie der Druck (nur das der Druck nicht strömt!) auf beide Gegenstände gleichmäßig. Der eine Gegenstand hatte vorher mehr Impuls, genauso wie der eine Reifen vorher höheren Druck hatte.

Abb. 6: Schülerlösung „Buch und Brett“

Als zweite Gruppe präsentierten die „Skater“. Hier wurden alle Sachverhalte im Wesentlichen richtig erkannt. Bei der ersten Antwort ergänzten sie noch „vom Schnelleren zum Langsamen“, ließen diese Erkenntnis aber nicht mehr in die Gemeinsamkeiten mit dem Reifenexperiment einfließen.

Der Antrieb bei Impulsströmen — Die Skater



Beschreibe zuerst, was man beobachtet hat und beantworte dann die drei Leitfragen unten.

- 1 • Von wo nach wo strömt der Impuls? 1
- 2 • Wie lange strömt der Impuls? 2
- 3 • Was sind die Gemeinsamkeiten mit dem Reifenexperiment? 3

1) Von A nach B

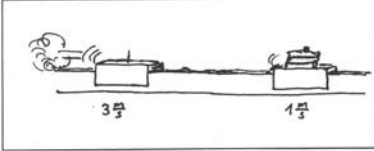
2) solange bis die Geschwindigkeit gleich ist.

3) Bei den Reifen fließt der Druck die Luft bis der Druck gleich ist.  
Bei dem Skateboard fließt der Impuls bis die Geschwindigkeit gleich ist.

Abb. 7: Schülerlösung „Skater“

Die dritte Gruppe löste zwar die ersten beiden Aufträge korrekt, konnte dann aber beim Schildern der Gemeinsamkeiten die Fließrichtung beim Impuls nicht verallgemeinern. Der Fehler wurde bei der Präsentation erkannt und auch verbessert, möglicherweise ist hier aber auch ein Schwachpunkt der Experimente und Arbeitsaufträge, da der Impuls in allen drei Fällen von links nach rechts fließt. Hier sollte man eventuell ein Experiment noch abwandeln.

Der Antrieb bei Impulsströmen — Wagen auf der Fahrbahn



Beschreibe zuerst, was man beobachtet hat und beantworte dann die drei Leitfragen unten.

- Von wo nach wo strömt der Impuls?
- Wie lange strömt der Impuls?
- Was sind die Gemeinsamkeiten mit dem Reifenexperiment?

1. Der Impuls strömt vom hinteren in den vorderen Wagen.  
 2. Der Impuls strömt so lange bis beide Wagen gleich schnell sind.  
 3. Bei den Reifen strömt die Luft von dem Reifen, in dem höheren Druck herrscht, in den, in dem niedrigeren Druck herrscht. Bei den Autos ist es genauso, bloß strömt der Impuls von dem Auto, in dem er höher ist, in das, in dem er niedriger ist.

Abb. 8: Schülerlösung „Wagen auf der Fahrbahn“

Die Hausaufgabe war die Formulierung des analogen Merksatzes und so begann die nächste Stunde mit dem Satz:

Der Impuls strömt (von selbst) vom Körper mit der höheren Geschwindigkeit zum Körper mit der niedrigen Geschwindigkeit und zwar so lange, bis beide gleich schnell sind.

## 5.2. Beispiel aus Klasse 10 – Wiederholung und Ausblick Rotationsmechanik

In diesem Unterrichtsbeispiel wurde in einer 10. Klasse wiederholend das Strom-Antriebs-Konzept in vier physikalischen Teilgebieten behandelt und dann analog auf die –für die Schülerinnen und Schüler völlig neue- Rotationsmechanik übertragen. Hier werden besonders die Transfermöglichkeiten deutlich für den Fall, dass das Konzept bereits genügend gefestigt ist. Die Klasse wurde durch die ganze Mittelstufe nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet, in dem das Strom-Antriebs-Konzept nur eines von vielen vereinheitlichenden Gesichtspunkten in den physikalischen Teilgebieten ist. Das Unterrichtsbeispiel wurde zu Demonstrationszwecken in einer Unterrichtsstunde durchgeführt, sollte aber besser auf mindestens zwei Stunden verteilt werden.

### 5.2.1. Teil 1: Die Wiederholung

Zu Beginn der Stunde wurden der Klasse die vier Arbeitsaufträge kurz vorgestellt, dann wurden Gruppen eingeteilt und die Arbeitsblätter zusammen mit Folien ausgeteilt. Die Arbeitsblätter und Folien hatten folgende Gestalt:

### Luft und Luftströme

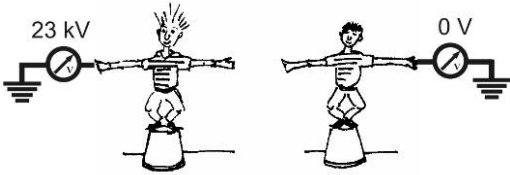


Die beiden Reifen sind durch einen Schlauch verbunden, die Ventile sind noch geschlossen. Das linke Manometer zeigt 1,5 bar und das rechte Manometer zeigt 3,5 bar.

- Was passiert, wenn die Ventile geöffnet werden? Erkläre!
- Was zeigen die Manometer am Ende an?
- Welcher Reifen enthält am Ende mehr Luft? Warum?

Abb. 1: Arbeitsauftrag Strömungen

### Elektrizität und Elektrizitätsströme




Der linke Schüler wurde durch einen Bandgenerator aufgeladen, das angeschlossene Voltmeter zeigt 23 kV. Das Voltmeter am rechten Schüler zeigt 0 V. Nun berühren sich die Schüler an den Händen.

- Was passiert? Erkläre!
- Was zeigen die Voltmeter am Ende an?
- Auf welchem Schüler sitzt am Ende mehr Elektrizität? Warum?

Abb. 2: Arbeitsauftrag Elektrizitätslehre

### Impuls und Impulsströme

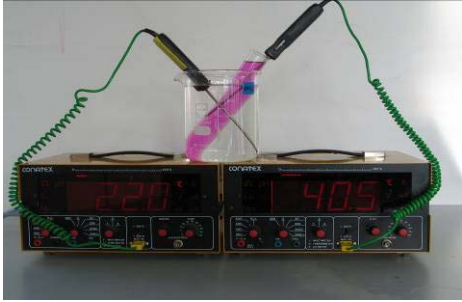


Der kleine, aber ungemein agile Herr Rutz kommt mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit angefahren, während Herr Schneider eher gemütlich durch die Lande fährt. Herr Rutz fährt auf Herrn Schneider auf.

- Was passiert physikalisch (Nein, sie fallen nicht!)? Erkläre!
- Welche Geschwindigkeit haben sie am Ende?
- Wer hat am Ende mehr Impuls? Warum?

Abb. 3: Arbeitsauftrag Mechanik

### Entropie und Entropieströme



Ein Reagenzglas mit gefärbtem Wasser der Temperatur 40,5°C wird in ein Becherglas mit Wasser der Temperatur 22°C gestellt.

- Was passiert? Erkläre!
- Was zeigen die Thermometer am Ende an?
- Welches Gefäß enthält am Ende mehr Entropie? Warum?

Abb. 4: Arbeitsauftrag Wärmelehre

Jede Gruppe erhielt nur einen der vier Aufträge und wurde mit der Bearbeitung erst einmal alleine gelassen. Durch diese arbeitsteilige Gruppenarbeit werden viele Kompetenzen gefördert und gefordert, die von den Bildungsstandards in den Kompetenzbereich „Kommunikation“ eingeordnet werden. Die Schülerinnen und Schüler übernehmen Verantwortung, die Arbeitsergebnisse klar und umfassend zu präsentieren und auch gegebenenfalls die Fragestellung noch einmal zu erläutern. Die in jedem Arbeitsauftrag verlangten Erklärungen zielen auf den Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“. Wenn man die Zeit und die Räumlichkeiten hat, wäre es an dieser Stelle natürlich vorteilhaft, den Gruppen zusätzlich ein Realexperiment zur Verfügung zu stellen. Die Bearbeitung der Aufgaben nahm etwa 10 Minuten in Anspruch und gelang ohne Hilfestellung durch den Lehrer.

Anschließend wurden die Ergebnisse von den Gruppen am Overhead-Projektor präsentiert. Um sicherzustellen, dass die Schülerinnen und Schüler die Ergebnisse „adressatengerecht“ präsentieren, macht man sich als Lehrer in solchen Phasen am besten „unsichtbar“ und platziert sich weit hinten in der Klasse. Dies erhöht die Verantwortung des Präsentierenden, nimmt der Klasse die Scheu und bewirkt echte Schülerinteraktion. Erkannte Fehler auf den Folien werden normalerweise von den Schülerinnen und Schülern sofort verbessert. Um hier die unkorrigierten Versionen zeigen zu können, bat ich meine Schüler, dies ausnahmsweise zu

lassen. Ich habe stattdessen die Punkte, die bei der Präsentation diskutiert wurden, hier markiert.

**Luft und Luftströme**

Die beiden Reifen sind durch einen Schlauch verbunden, die Ventile sind noch geschlossen. Das linke Manometer zeigt 1,5 bar und das rechte Manometer zeigt 3,5 bar.

1. Was passiert, wenn die Ventile geöffnet werden? Erkläre!
2. Was zeigen die Manometer am Ende an?  $\rightarrow 2,5 \text{ bar} \rightarrow$  Druckausgleich
3. Welcher Reifen enthält am Ende mehr Luft? Warum?

1. Die Luft der Reifen höherer Drucks strömt in den Reifen niedrigeren Drucks solange bis zu Druckausgleich geschaffen ist.  
Der Antrieb für Luftströmungen ist der Druckunterschied zwischen den Reifen unabhängig von der Luftmenge der jeweiligen Reifen.

3. Der linke Reifen enthält mehr Luft, da er ein größeres Volumen hat und somit mehr Luft fassen kann.

Abb. 5: Schülerlösung Strömungen

**Elektrizität und Elektrizitätsströme**

Der linke Schüler wurde durch einen Bandgenerator aufgeladen, das angeschlossene Voltmeter zeigt 23 kV. Das Voltmeter am rechten Schüler zeigt 0 V. Nun berühren sich die Schüler an den Händen.

1. Was passiert? Erkläre!
2. Was zeigen die Voltmeter am Ende an?
3. Auf welchem Schüler sitzt am Ende mehr Elektrizität? Warum?

1) Die Elektrizität strömt von Stellen ~~niedriger~~ <sup>höheren</sup> Potentials zu Stellen niedrigeren Potentials, also strömt die Elektrizität von Schüler A zu Schüler B bis beide ~~ein~~ <sup>ein</sup> ~~Potential~~ <sup>Spannung</sup> Gleichgewicht herrscht. Schüler B bekommt einen „Schlag“.

2) Beide Voltmeter zeigen  $11,5 \text{ kV}$  an ( $23:2=11,5$ )

3) Beide Schüler haben gleich viel Elektrizität, weil sich die Spannung angleicht  
(Regel: Elektrizität strömt von Stellen ~~niedriger~~ <sup>von selbst</sup> höherer Spannung zu Stellen niedriger Spannung.)

Abb. 6: Schülerlösung Elektrizitätslehre

**Impuls und Impulsströme**

Der kleine, aber ungemein agile Herr Rutz kommt mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit angefahren, während Herr Schneider eher gemütlich durch die Lande fährt. Herr Rutz fährt auf Herrn Schneider auf.

1. Was passiert physikalisch (Nein, sie fallen nicht!)? Erkläre!
2. Welche Geschwindigkeit haben sie am Ende?
3. Wer hat am Ende mehr Impuls? Warum?

1) Der Impuls fließt von der Stelle mit hoher Geschwindigkeit (A) zur Stelle mit niedriger Geschwindigkeit (B).  
Der Impuls strömt so lange, bis beide gleiche Geschwindigkeit erreichen.

2) Am Ende haben beide die Mittelgeschwindigkeit  $(35 \text{ km/h} + 5 \text{ km/h}) : 2 = 20 \text{ km/h}$   
dann fließt kein Impuls mehr.

3) Da beide am Ende die selbe Geschwindigkeit haben, hat derjenige mit der höheren Masse auch den höheren Impuls (B).

Abb. 7: Schülerlösung Mechanik

**Entropie und Entropieströme**

Ein Reagenzglas mit gefärbtem Wasser der Temperatur  $40,5^\circ\text{C}$  wird in ein Becherglas mit Wasser der Temperatur  $22^\circ\text{C}$  gestellt.

1. Was passiert? Erkläre!
2. Was zeigen die Thermometer am Ende an?
3. Welches Gefäß enthält am Ende mehr Entropie? Warum?

1: Die Wassertemperaturen padden sich bei einem gleichen Wert ein, da Entropie von Stellen höher zu Stellen niedriger Temperatur fließt. Sobald beide auf die gleiche Temperatur ist kein Antrieb mehr da, und die Entropiestrom stoppt.

2: Thermometer zeigen das selbe an  
Temperatur liegt unterem Mittelwert von  $31^\circ$  aber über  $22^\circ$  da Entropie von Reagenzglas ins Becherglas fließt und das Wasser erwärmt  
des Becherglas

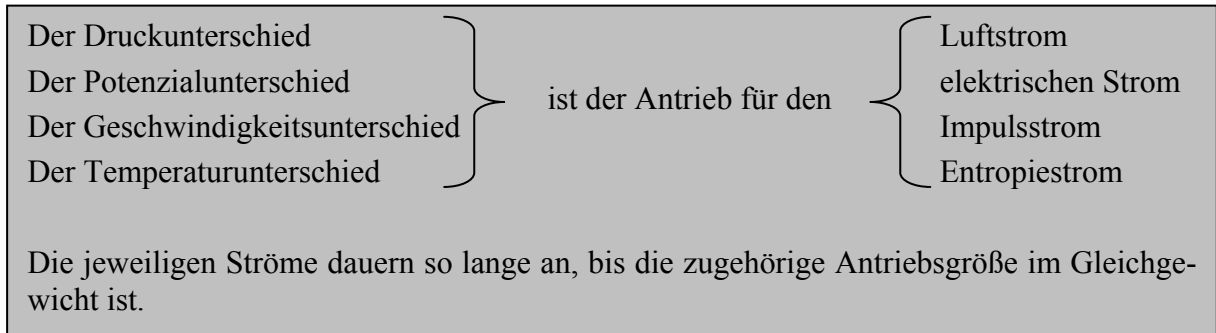
3. Die Entropiemenge hängt von Größe und Temperatur des Inhalts ab. Da nach einer Zeit beide wassermengen gleichwarm sind, ist nur noch die Gefäßgröße für den Entropieinhalt relevant.  
D.h. im Becherglas ist mehr Entropie, als in Reagenzglas enthalten.

Abb. 8: Schülerlösung Wärmelehre

Die Verwechslung von Spannung und Potenzial wurde sofort bei der Präsentation bemerkt, die errechneten Endwerte von Druck, Potenzial und Geschwindigkeit wurden zuerst so akzeptiert. Da ich während der Erarbeitung bemerkt hatte, dass die Entropiegruppe diesen Teil der Frage sehr gut beantwortet hatte, ließ ich diese als letzte präsentieren. Nachdem der Sprecher

dieser Gruppe erläutert hatte, warum die Endtemperatur niedriger als der Mittelwert sein muss, wurden auch die anderen Folien noch überprüft und verbessert.

Als Fazit wurde dann die Gemeinsamkeit bei allen Vorgängen herausgestellt:



Nun gingen wir daran zu untersuchen, ob dieses Prinzip auch bei Drehbewegungen Gültigkeit hat. Es wird sich zeigen, dass es den Schülerinnen und Schülern sehr leicht fiel, dieses Konzept auf ein neues Gebiet, hier die Drehbewegungen, zu übertragen.

### 5.2.2. Teil 2: Die Rotationsmechanik

Die Rotationsmechanik kann man in weitgehender Analogie zu anderen physikalischen Teilgebieten behandeln. Am Anfang steht eine Begriffsbildung des Drehimpulses als mengenartige, strömende Größe und der Winkelgeschwindigkeit als zugehörige intensive Größe. Zur Begriffsbildung des Drehimpulses kann man die Schülerinnen und Schüler bei der Vorstellung „Drehschwung“ abholen. Man zeigt verschiedene Räder, die sich verschieden schnell drehen und kommt schließlich zur Regel:

Ein Körper enthält umso mehr Drehimpuls,  
 – je größer seine Winkelgeschwindigkeit,  
 – je schwerer er ist (vorläufig!).

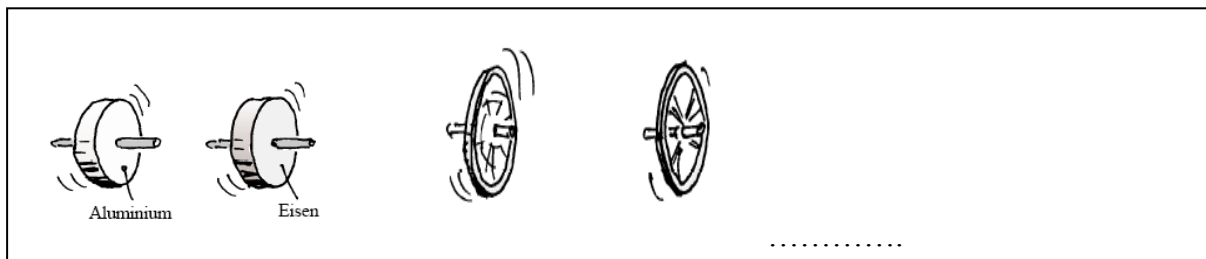


Abb. 9: Verschieden schwere und verschieden schnelle Schwungräder

Gerade in der Mittelstufe ist es sicherlich legitim, anstatt „Winkelgeschwindigkeit“ auch einfach den Begriff „Drehgeschwindigkeit“ zu benutzen. Wichtig ist, den Drehimpuls gegen den Impuls abzugrenzen: Ein Rad, das sich dreht, aber sich nicht von der Stelle bewegt, hat Drehimpuls, aber keinen gewöhnlichen Impuls. Ein Rad kann auch nur Impuls haben, oder beides.



Abb. 10: Das linke Rad hat nur Drehimpuls, das rechte Rad ausschließlich Impuls

Diese Begriffsbildung wurde in der konkreten Unterrichtsstunde sehr zügig durchgeführt und dann das analoge Experiment demonstriert. Zwei Räder, die sich verschieden schnell drehen, wurden über eine Rutschkupplung miteinander verbunden. Leider lässt sich der Ablauf des Experiments an den Bildern nur schwer erkennen. Das linke Bild zeigt die noch unverbundenen Räder, von denen sich das rechte Rad schnell und das linke langsam dreht. Im mittleren Bild sind die Räder verbunden, haben aber noch nicht die gleiche Winkelgeschwindigkeit erreicht. Im rechten Bild drehen sich die Räder schließlich gleich schnell.

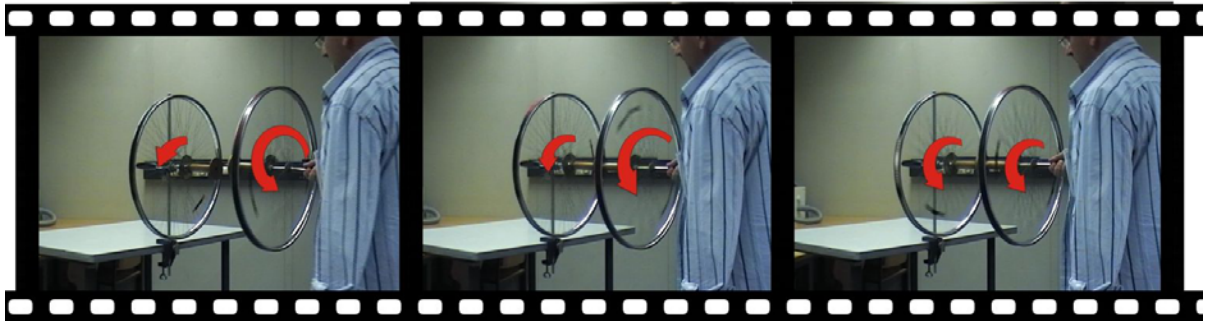


Abb. 11: Der Drehimpuls verteilt sich auf die beiden Räder

Die Interpretation durch die Schülerinnen und Schüler erfolgte völlig problemlos: Der Drehimpuls strömt so lange vom rechten Rad in das linke Rad, bis die beiden Räder gleiche Winkelgeschwindigkeit haben („sich gleich schnell drehen“). Da die beiden Räder gleich gebaut sind, enthalten sie am Ende gleich viel Drehimpuls.<sup>18</sup>

Da meine Klasse bereits die curricularen Teilgebiete kannte, in denen man mit dem Strom-Antriebs-Konzept arbeiten kann, eröffnete ich mit der Rotationsmechanik ein Gebiet, das im Mittelstufenlehrplan nicht vorgesehen ist und für das man wohl eher selten die Zeit findet. Gerade dadurch verdeutlicht dieses Beispiel, wie man durch das Ausnutzen von Analogien und Basiskonzepten in kurzer Zeit viel erreichen kann.

<sup>18</sup> Wer sich für eine umfassende Behandlung der Rotationsmechanik in der Mittelstufe interessiert findet näheres dazu z. B. in: Der Karlsruher Physikkurs S1, Band1: Energie, Impuls, Entropie, S. 95ff (AULIS-Verlag). Die hier beschriebene Stunde kann ein möglicher Einstieg sein.

## 6. Anwendungen und Aufgaben

In den Kapiteln 2 und 3 haben wir das Strom-Antrieb-Widerstandskonzept vorgestellt. Um die Strukturen deutlich herauszuarbeiten, haben wir auf die Darstellung von Anwendungen, Ausblicken und Übungsbeispielen in diesen Kapiteln verzichtet. Im Unterricht darf das Strom-Antrieb-Widerstandskonzept natürlich nicht zum Selbstzweck werden, sondern nur dazu dienen, den Schülerinnen und Schülern das Erlernen der Physik zu erleichtern. Im Vordergrund müssen nach wie vor die Phänomene aus der Umwelt der Schülerinnen und Schüler stehen, die dann mit dem erlernten Handwerkszeug bearbeitet werden können.

Im folgenden Kapitel soll nun an Hand einiger weniger Beispiele ein Eindruck vermittelt werden, wie das Strom-Antrieb-Widerstandskonzept als Handwerkszeug eingesetzt werden kann. Einige Beispiele sind als Übungen verwendbar, andere ermuntern die Schülerinnen und Schüler zum Nachdenken, ob es zu gewissen Phänomenen (z.B. die Diode in der Elektrizitätslehre) Analogien in einem anderen Teilgebiet der Physik gibt.

### 6.1. Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen

#### S1 Kann man mit der Fahrradluftpumpe einen Autoreifen aufpumpen?



Mit einer guten Fahrradpumpe ist es möglich, einen Reifenüberdruck von 4,5 bar herzustellen. In einem Autoreifen herrscht ein Überdruck von ca. 2 bar. Warum pumpt niemand Autoreifen mit einer Fahrradpumpe auf, obwohl es Ventiladapter zu kaufen gibt?

*Lösung:* Mit der Fahrradluftpumpe erzielen wir nur kleine Stromstärken. Es dauert also ziemlich lange und ist deshalb schweißtreibend, einen Autoreifen mit der Fahrradluftpumpe aufzupumpen.

## S2 Kontrolle des Reifendrucks



Du kontrollierst an der Tankstelle den Druck der Luft im Ersatzreifen. Das Manometer zeigt 0 bar an. Ist keine Luft im Reifen?

*Lösung:* Das Manometer an der Tankstelle zeigt den Überdruck an. Der tatsächliche Druck ist also 1 bar. Wäre keine Luft im Reifen, wäre der Druck 0 bar.

## S3 Der Riesenmohrenkopf



Deinen Mohrenkopf kannst Du unter der Vakuumlöcke enorm vergrößern. Könntest Du mit dem Verkauf von Riesenmohrenköpfen nicht ein Bombengeschäft machen?

*Tipp:* Wie verhält sich ein Luftballon, der etwas aufgeblasen ist, unter der Vakuumlöcke?

*Lösung:* Das schaumige Innere des Mohrenkopfes besteht im Wesentlichen aus Luft mit  $p = 1$  bar. Wenn nun der Druck außerhalb des Mohrenkopfes abnimmt, dehnt sich die Luft im Innern des Mohrenkopfes so lange aus, bis  $p_{\text{innen}} = p_{\text{außen}}$ .

## S4 Luftströme

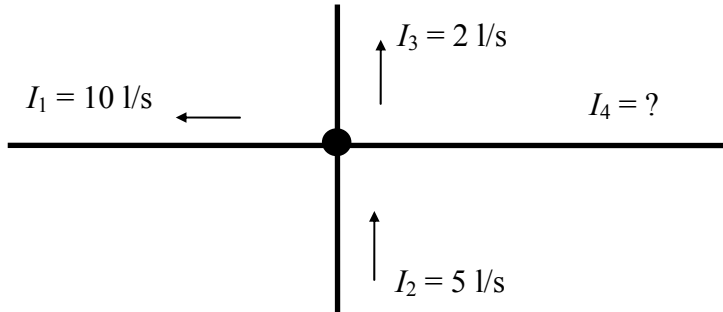
Ein Reifen hat einen Überdruck von 5 bar. Ein zweiter größerer Reifen ist völlig platt und soll gefüllt werden.

- Es stehen alle möglichen Sorten von dünnen und dicken, langen und kurzen Schläuchen zur Verfügung. Welchen Schlauch würdest Du zum schnellen Füllen des zweiten Reifens wählen? Begründe deine Wahl, verwende den Begriff Widerstand.
- Was kannst Du über den Luftdruck in der Leitung aussagen? Ist er überall gleich groß?
- Wann hört die Luft auf zu strömen? Was kannst Du über die Menge der Luft in beiden Reifen aussagen?



*Lösung:* Den kleinsten Widerstand hat der kurze, dicke Schlauch. Der Druck nimmt längs der Leitung ab. Die Luft hört auf zu strömen, wenn in beiden Reifen gleicher Druck herrscht. Im großen Reifen befindet sich dann mehr Luft als im kleinen Reifen. Der Druck ist dann kleiner als der Mittelwert der beiden Druckwerte.

**S5 Die Knotenregel**



Fließt der Wasserstrom 4 nach rechts oder nach links? Wie groß ist die Stärke  $I_4$  des Wasserstroms?

*Lösung:* In den Knoten muss genau so viel hinein- wie hinausströmen. Also  $I_4 = 7$  l/s nach links.

**S6 Stromstärke = Geschwindigkeit?**

In einem Wasserrohr beträgt die Stromstärke 2 l/s, in einem anderen 3 l/s. Kann man aus diesen Angaben schließen, in welchem Rohr das Wasser schneller fließt? Begründe deine Antwort.

*Lösung:* Im Rhein ist die Wasserstromstärke viel größer als in einem Wildbach. Andererseits ist die Geschwindigkeit des Wassers im Wildbach i.a. größer als die Geschwindigkeit des Wassers im Rhein.

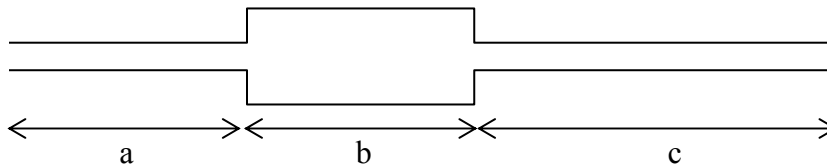
Fazit: Unterscheide zwischen den Größen Stromstärke und Geschwindigkeit.

**S7 Wie bestimmst Du die Stromstärke?**

Durch ein Rohr fließen in 15 s 300 l Wasser. Wie groß ist die Wasserstromstärke?

*Lösung:*  $I = V/t = 300 \text{ l} / 15 \text{ s} = 20 \text{ l/s}$

**S8 Ist das Wasser im Rohr überall gleich schnell?**



- a) Die Stromstärke am linken Ende des Rohrs beträgt 10 l/s. Wie groß ist die Stromstärke am rechten Rand des Rohrs? Begründe.
- b) Vergleiche die Widerstände der Rohrabschnitte a, b, c.
- c) Die Druckdifferenz zwischen den Enden des Rohrabschnitts a ist 2 bar. Ist die Druckdifferenz zwischen den Enden der Rohrabschnitte b, c größer, gleich oder kleiner als 2 bar? Begründe.

*Lösung:* Solange die Leitung kein Leck hat, ist überall die Stromstärke gleich groß.  $R_b < R_a < R_c$ , wegen der Länge und der Querschnittsfläche der Leitungsabschnitte.

$\Delta p_b < \Delta p_a < \Delta p_c$ , da bei größerem Widerstand ein größerer Antrieb benötigt wird, um die gleiche Stromstärke zu erhalten.

### S9 Know-How der Kleingärtner

- Du besitzt zwei Gartenschläuche und wunderst Dich, dass in der gleichen Zeit aus dem einen viel mehr Wasser strömt als aus dem anderen. Wie kann das sein? Der Wasserhahn ist natürlich in beiden Fällen voll aufgedreht, das Schlauchende ist bei beiden Schläuchen offen.
- An Sommerabenden beobachtest Du häufig, dass bei voll aufgedrehtem Wasserhahn die Wasserstromstärke bei gleichem Schlauch viel kleiner ist als am nächsten Morgen. Was muss sich geändert haben? Der Widerstand des Schlauchs, der Luftdruck, der Druck in der Wasserleitung? Welche Konsequenz hat das?
- Um eine Gießkanne mit 10 l Wasser aus dem Schlauch zu füllen, brauchst Du 20 s. Wie groß ist die Wasserstromstärke am Ende des Schlauchs?
- Ist die Wasserstromstärke am Anfang des Schlauchs größer, genau so groß oder kleiner?

*Lösung:*

- Die Schläuche unterscheiden sich in ihrem Widerstand. Sie sind also unterschiedlich lang oder unterschiedlich dick.
- Die meisten Leute gießen abends, dann ist der Druck in der Wasserleitung oft geringer als morgens. Folglich ist abends auch der Antrieb  $\Delta p$  kleiner als morgens.
- $I = V/t = 10 \text{ l} / 20 \text{ s} = 0,5 \text{ l/s}$ .
- Die Wasserstromstärke ist überall gleich groß.

### S10 David gegen Goliath



Der nur wenig aufgepustete und der stark aufgepustete Luftballon werden durch ein Röhrchen verbunden. Was passiert? Kannst Du das erklären?

*Lösung:* Erstaunlicherweise strömt die Luft vom kleineren in den größeren Ballon. Also muss der Druck im kleinen Ballon höher sein als im großen. Dass dies tatsächlich der Fall ist, merkt man schon beim Aufpusten. Am Anfang geht das sehr schwer und wird später leichter.

### S11 Kleine Reifen, große Reifen

Du hast drei Reifen: Zwei kleine Reifen von einem VW-Polo und einen großen Reifen von einem Mercedes, in denen folgender Druck herrscht:

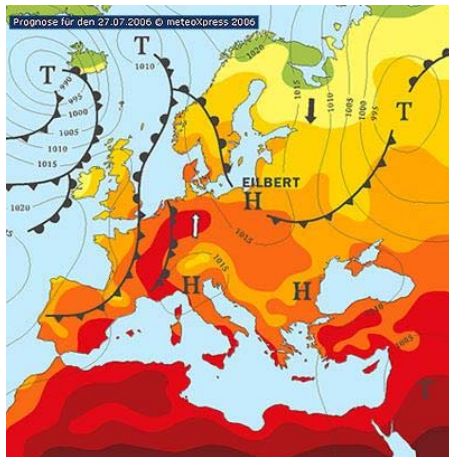
- Reifen Polo: 2,8 bar, 2. Reifen Polo: 3,0 bar, Reifen Mercedes: 3,0 bar.
- a) Welchen Druck würde ein Manometer an der Tankstelle für den 1. Reifen anzeigen?

- b) Welcher der drei Reifen enthält die meiste Luft?
- c) Du verbindest den Mercedes-Reifen mit einem Polo-Reifen, in dem ein Druck von 4 bar herrscht. Max Schlaumeier spricht: „Natürlich strömt die Luft von dem großen Reifen in den kleinen Reifen.“ Stimmt das?
- d) Max Schlaumeier kann noch mehr Physik: „Die Luft strömt so lange, bis in beiden Reifen gleich viel Luft ist.“ Was meinst du dazu?
- e) Dritte Beobachtung von Max Schlaumeier: In der Mitte der Leitung herrscht ein Druck von 5 bar. Kann das sein?

*Lösung:*

- a) Das Manometer an der Tankstelle misst den Überdruck. Also zeigt das Manometer generell 1 bar weniger an.
- b) Der Mercedesreifen enthält am meisten Luft, da er groß ist und in ihm ein hoher Druck herrscht.
- c) Die Luft strömt von Stellen hohen Drucks zu Stellen tiefen Drucks, also vom Polo- in den Mercedes-Reifen.
- d) Die Luft strömt so lange, bis in beiden Reifen gleicher Druck herrscht.
- e) Der Druck in der Leitung kann nur Werte zwischen 3 bar und 4 bar annehmen.

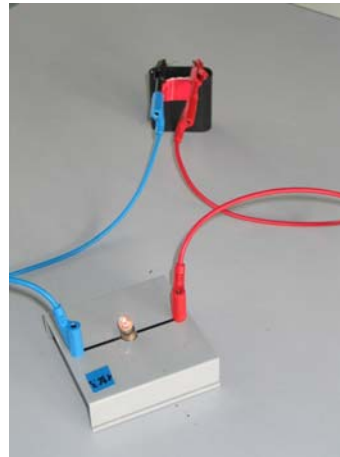
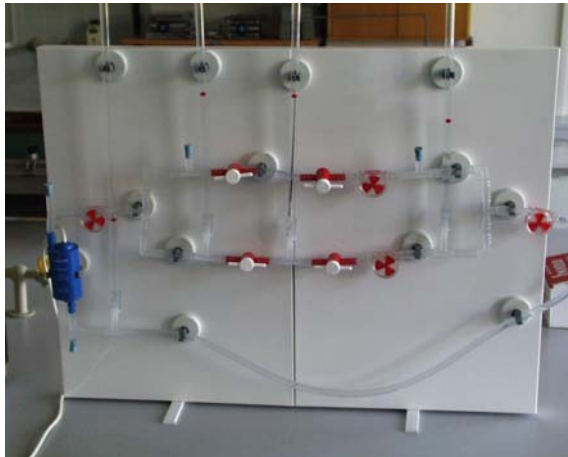
## S12 Wetterkarte



Interpretiere die nebenstehende Wetterkarte. In welche Richtung weht der Wind? Warum weht der Wind nicht geradlinig? Ermittle die Ursache, ohne diese näher zu erklären. Was bedeuten die Linien mit der Zahlenangabe?

*Lösung:* Die Luft strömt vom Hochdruckgebiet ins Tiefdruckgebiet. Dass die Luft nicht geradlinig strömt, hängt mit der Erdrotation zusammen. Die Linien mit den Zahlenangaben sind Isobaren.

**S13 Wasserstromkreis – elektrischer Stromkreis**



Vergleiche die beiden Stromkreise. Welche Bauteile, welche Größen entsprechen einander? Beschreibe die Vorgänge in beiden Stromkreisen. Wie kannst Du die Stromstärken verändern?

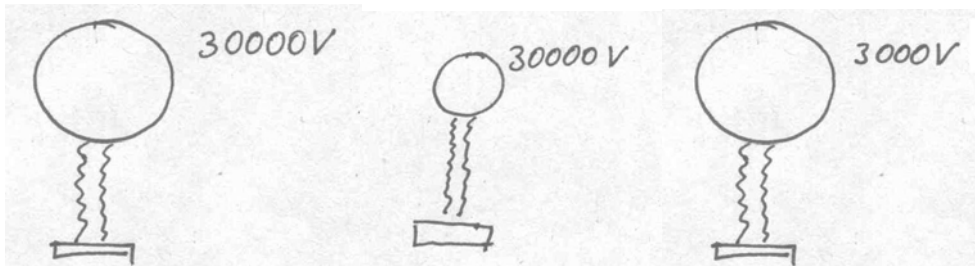
*Lösung:*

|                         | Strömende Größe | Antrieb              | Widerstand       | Leitung  | Pumpe    |
|-------------------------|-----------------|----------------------|------------------|----------|----------|
| Wasserstromkreis        | Wassermenge     | $\Delta p$           | „Drehwiderstand“ | Schlauch | Pumpe    |
| Elektrischer Stromkreis | El. Ladung      | $\Delta \varphi = U$ | Lämpchen         | Kabel    | Batterie |

Die Stromstärke hängt ab von Antrieb und Widerstand.

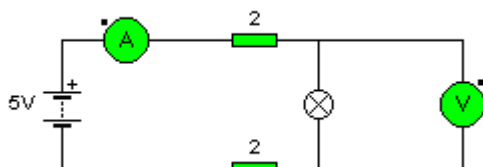
**6.2. Elektrizitätslehre**

**E1 Auf welcher Kugelform befindet sich am meisten Elektrizität?**



*Lösung:* Die Vermutung wird durch eine Messung überprüft.

**E2 Elektrotechnische Probleme 1**



Das Amperemeter zeigt eine Stromstärke von 50 mA an. Beide Widerstände haben  $R = 2\Omega$ .

- a) Markiere in der Schaltskizze Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe. Gib die zugehörigen Werte des Potentials an.
- b) Welche Spannung zeigt das Voltmeter an?

c) Bestimme den Gesamtwiderstand sowie den Widerstand des Lämpchens.

*Lösung:*

Rot ( $\varphi = 5 \text{ V}$ ): Batterie – Widerstand 1, gelb ( $\varphi = 4,9 \text{ V}$ ): Widerstand 1 – Lämpchen, grün ( $\varphi = 0,1 \text{ V}$ ): Lämpchen – Widerstand 2, blau ( $\varphi = 0 \text{ V}$ ): Widerstand 2 – Batterie.

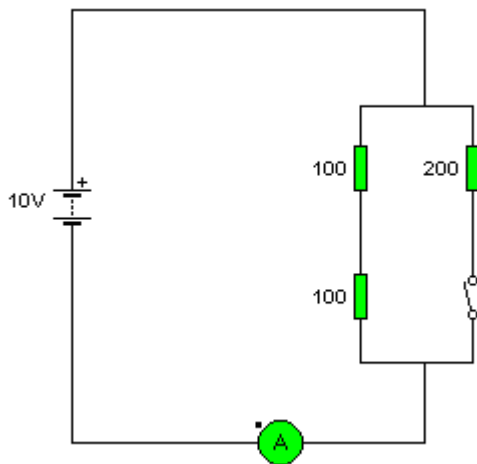
Die Spannung an beiden Widerständen ist  $U = R \cdot I = 2 \Omega \cdot 50 \text{ mA} = 0,1 \text{ V}$

Das Voltmeter zeigt  $U = 4,8 \text{ V}$  an.

$$R_{ges} = U/I = 5 \text{ V}/50 \text{ mA} = 100 \Omega$$

(Selbstverständlich arbeiten wir hier mit idealen Messgeräten. Amperemeter haben also den Innenwiderstand  $0 \Omega$ , der Innenwiderstand der Voltmeter ist unendlich.)

### E3 Elektrotechnische Probleme 2



a) Zeichne bei geschlossenem Schalter in der angegebenen Schaltung Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe.

Berechne die Stromstärke, die das Amperemeter anzeigt.

Bestimme den Gesamtwiderstand der Schaltung.

b) Jetzt wird der Schalter geöffnet. Zeichne Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe.

Wie groß ist jetzt der Gesamtwiderstand?

Welche Stromstärke zeigt das Amperemeter jetzt an?

*Lösung:*

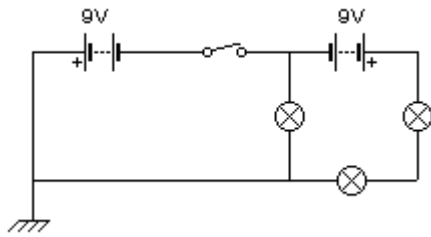
Zu a): rot ( $\varphi = 10 \text{ V}$ ): Batterie –  $100 \Omega / 200 \Omega$  Widerstand, gelb ( $\varphi = 5 \text{ V}$ ): zwischen den  $100 \Omega$  Widerständen, blau ( $\varphi = 0 \text{ V}$ ): Reststrecke.

Jeder Zweig hat den Widerstand  $200 \Omega$ . Durch jeden Zweig fließt ein Strom der Stärke  $I = U/R = 10 \text{ V}/200 \Omega = 50 \text{ mA}$ . Das Amperemeter zeigt demnach  $100 \text{ mA}$  an.

Der Gesamtwiderstand der Schaltung ist  $R = U/I = 10 \text{ V}/100 \text{ mA} = 100 \Omega$ .

Zu b): Bei geöffnetem Schalter fließt durch den  $200 \Omega$  Widerstand kein Strom, also ist der Antrieb am Widerstand  $0 \text{ V}$ , das Potenzial vor und hinter dem  $200 \Omega$  Widerstand also gleich. Das Potenzial zwischen den beiden  $100 \Omega$  Widerständen ist  $5 \text{ V}$ , durch den linken Widerstand fließen also  $I = U/R = 5 \text{ V}/100 \Omega = 50 \text{ mA}$ . Diesen Wert zeigt auch das Amperemeter an. Der Gesamtwiderstand ist, falls die Regel  $R_{ges} = R_1 + R_2$  noch nicht zur Verfügung steht,  $R = U/I = 10 \text{ V}/50 \text{ mA} = 200 \Omega$ .

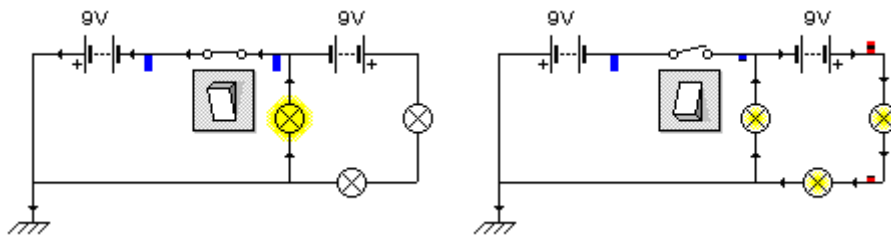
### E4 Elektrotechnische Probleme 3



Kennzeichne bei geschlossenem (geöffnetem) Schalter die Stellen gleichen Potentials und gib die Potenzialwerte an. In welche Richtung fließt jeweils der Strom?

Alle Lämpchen sind baugleich.

*Lösung:*



Bei geschlossenem Schalter:

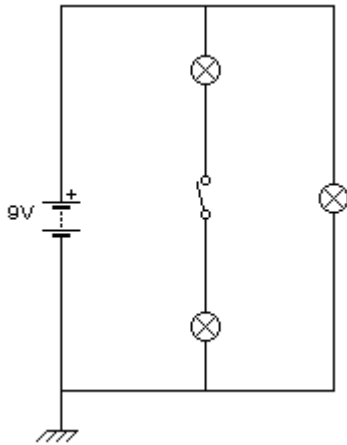
Alle Leitungsabschnitte, die geerdet sind, befinden sich auf dem Potenzial  $\varphi = 0 \text{ V}$ . Also befindet sich der Abschnitt rechts vom  $-$ Pol der linken Batterie auf  $\varphi = -9 \text{ V}$ . Das Potenzial rechts vom Pluspol der 2. Batterie liegt um  $9 \text{ V}$  höher:  $\varphi = 0 \text{ V}$ . Also ist die Spannung (der Antrieb) zwischen dieser Stelle und der Erde  $0 \text{ V}$ , das rechte und das untere Lämpchen leuchten nicht. Die Potentialdifferenz an den Anschlüssen des linken Lämpchens hingegen beträgt  $9 \text{ V}$ , es leuchtet hell.

Bei geöffnetem Schalter:

Jetzt kann die Elektrizität nur vom Pluspol der rechten Batterie zu ihrem Minuspol fließen. Der Strom durch alle drei Lämpchen ist gleich, also auch der Antrieb (= die Spannung) an jedem Lämpchen. Insgesamt ist die Spannung  $9 \text{ V}$ , an jedem Lämpchen ist die Spannung also  $3 \text{ V}$ .

Wir beginnen wieder an dem geerdeten Leitungsabschnitt mit  $\varphi = 0 \text{ V}$ . An jedem Lämpchen ändert sich das Potenzial um  $3 \text{ V}$ .

**E5 Elektrotechnische Probleme 4**



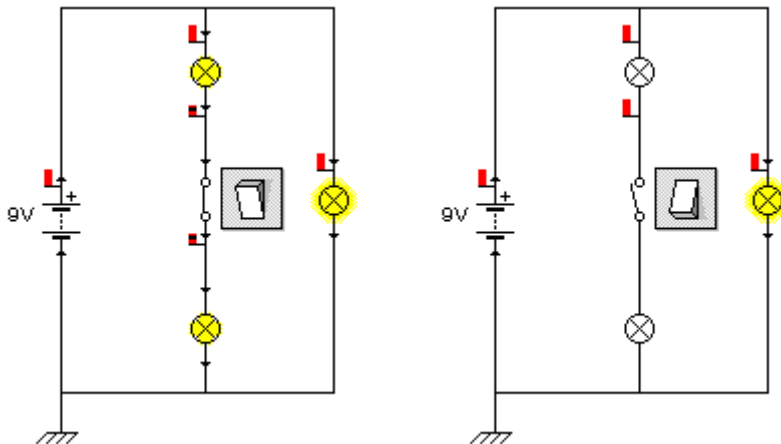
Die Lämpchen sind von gleicher Bauart.

Kennzeichne bei geschlossenem (geöffnetem) Schalter die Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe und gib die Potenzialwerte aller Leitungsabschnitte an.

Wie groß ist die Stromstärke in den Leitungsabschnitten, wenn man annimmt, dass jedes Lämpchen den Widerstand  $R = 100 \Omega$  hat?

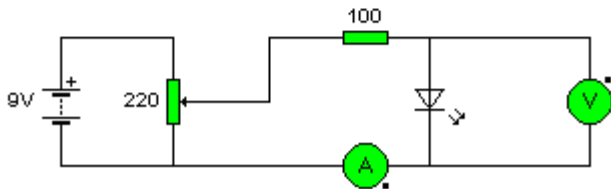
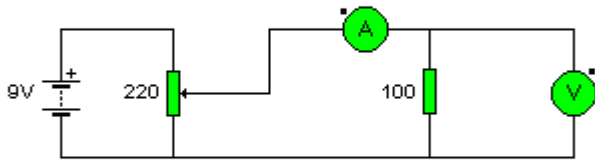
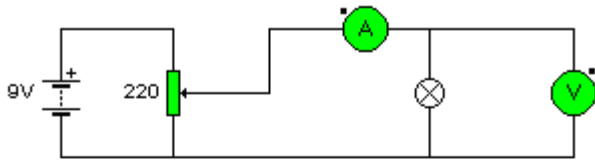
Welche Lampe leuchtet noch, wenn der Schalter geöffnet ist?

*Lösung:*



Start wieder bei dem geerdeten Leitungsabschnitt mit  $\varphi = 0 \text{ V}$ . Die Batterie erhöht das Potenzial am Pluspol um  $9 \text{ V}$ . Fließt durch zwei baugleiche Lämpchen der gleiche Strom, dann ist auch der Antrieb gleich:  $U = 4,5 \text{ V}$  usw.

**E6 Kennlinien (Praktikum)**



a) Bestimme die Stromstärken

|                                  | $U$ in V            | 0 | 0,5 | 1    | 2   | 3    | 4   | 5    | 6   |
|----------------------------------|---------------------|---|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| langes Glühbirnchen (4V, 0,1 A)  | $I$ in mA           |   |     |      |     |      |     |      |     |
|                                  | $R=U/I$ in $\Omega$ |   |     |      |     |      |     |      |     |
| $R = 100\Omega$                  | $I$ in mA           |   |     |      |     |      |     |      |     |
|                                  | $R=U/I$ in $\Omega$ |   |     |      |     |      |     |      |     |
|                                  | $U$ in V            | 0 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2,0 | 2,25 | 2,5 |
| Leuchtdiode in Durchlassrichtung | $I$ in mA           |   |     |      |     |      |     |      |     |
|                                  | $R=U/I$ in $\Omega$ |   |     |      |     |      |     |      |     |

b) Schalte die Diode in Sperrichtung

Was beobachtest Du?

Beschreibe die Analogie zwischen Dioden, Ventilen in Fahrradschläuchen und Seilen

c) Zeichne die Kennlinien in ein gemeinsames Koordinatensystem

( $U$ - $I$ -Diagramm:  $1V \equiv 2cm$ ,  $20mA \equiv 1cm$ )

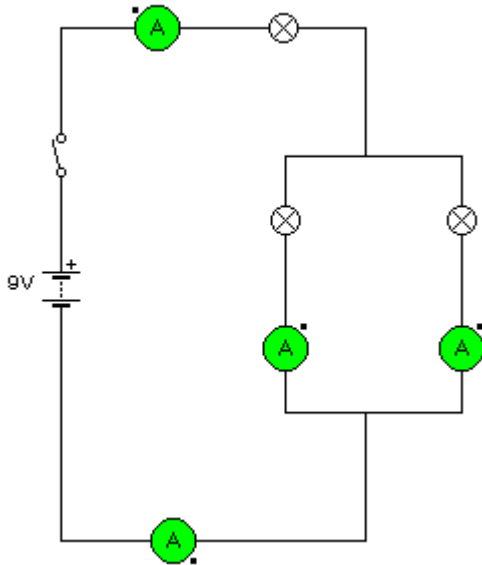
d) Mache Aussagen über den Widerstand

(1) des Lämpchens



- (2) des technischen Widerstandes
- (3) der Leuchtdiode
- e) 2 Methoden zur Bestimmung des Widerstandes ( $R = 100\Omega$ )
  - (1) direkte Messung mit dem Ohmmeter
  - (2) indirekte Messung  $R = \frac{U}{I} =$

### E7 Die Knotenregel (Praktikum)



Versuchsaufbau: Verwende  $L_1$  (großes Kugelbirnchen, 12V/4W),  $L_2$  (kleines Kugelbirnchen, 6V/2W),  $L_3$  (kleines Kugelbirnchen, 6V/2W)

a) Bestimme die Stromstärken:

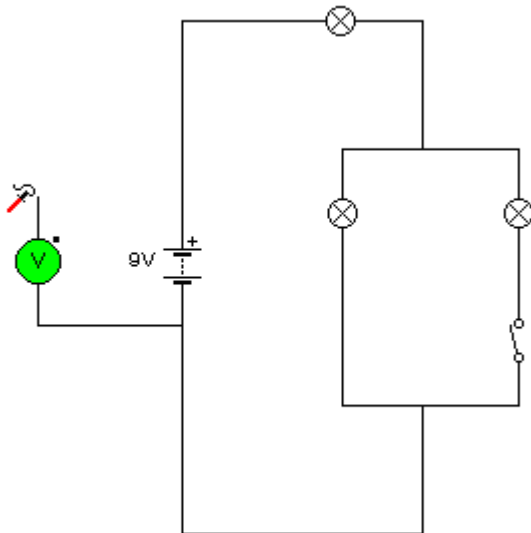
$$I_1 = \quad I_2 = \quad I_3 = \quad I_4 =$$

b) Ergebnisse:

- i) Bestätige die Knotenregel an Hand der Messergebnisse.
- ii) Formuliere die Knotenregel in Worten.

c) Analogien:

Wie lautet die Knotenregel für Impulsströme, für Wasserströme?

**E8 Messung des elektrischen Potentials (Praktikum)**

Versuchsaufbau: Verwende  $L_1$  (kleines Kugelbirnchen, 6V/2W),  $L_2$  (großes Kugelbirnchen, 12V/4W),  $L_3$  (kleines Kugelbirnchen, 6V/2W)

a) Bestimme bei geschlossenem Schalter die Potenziale an den verschiedenen Stellen des Stromkreises.

Zeichne Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe.

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 =$$

b) Bestimme bei geöffnetem Schalter die Potenziale an den verschiedenen Stellen des Stromkreises.

Zeichne Stellen gleichen Potentials in gleicher Farbe.

$$\varphi_1 = \quad \varphi_2 = \quad \varphi_3 = \quad \varphi_4 =$$

c) Bestimme bei geschlossenem Schalter die Spannungen an

$$\text{der Batterie: } U_B = \quad , L_1: U_1 = \quad , L_2: U_2 = \quad , L_3: U_3 =$$

d) Bestimme bei geöffnetem Schalter die Spannungen an

$$\text{der Batterie: } U_B = \quad , L_1: U_1 = \quad , L_2: U_2 = \quad , L_3: U_3 =$$

e) Ergebnisse:

i) Wie muss ein Voltmeter geschaltet werden?

ii) Erkläre, warum bei geöffnetem Schalter das eine Lämpchen nicht leuchtet.

Warum misst Du hinter diesem Birnchen das gleiche Potenzial wie vor dem Birnchen?

iii) Gib zwei Funktionen der Batterie in diesem Stromkreis an.

Lösung:

1. Die Batterie belädt den Energieträger mit Energie.

2. Die Batterie pumpt die Elektrizität vom  $-$ Pol (Stelle tiefen Potentials) zum  $+$  Pol (Stelle hohen Potentials)

## 6.3. Mechanik

### M1 Der schwebende Magnet



Warum schwebt der obere Magnet? Müsste er nicht fallen? Es fließt doch ständig Impuls durch das Gravitationsfeld in den Magneten. Was passiert mit diesem Impuls?

*Lösung:* Ohne den unteren Magneten würde der Impuls sich im oberen Magneten anhäufen, er würde immer schneller fallen. Da der Magnet schwebt, muss der Impuls, der aus dem Gravitationsfeld in den oberen Magneten strömt, auch gleich wieder herausströmen. Durch die Stange? Nein, denn sie ist weder auf Zug noch auf Druck belastet. Die Impulsleitung ist das Magnetfeld.

### M2 Elektrische Leiter, Wärmeleiter, Impulsleiter?



In der Elektrizitätslehre sprechen wir über elektrische Leiter, in der Wärmelehre über Wärmeleiter. Und in der Mechanik? Gibt es mechanische Leiter? Was sollten diese Leiter eigentlich leiten? Sieht man diesen Leitern an, ob gerade ein mechanischer Strom fließt? Sieht man dem Leiter vielleicht sogar die Stromrichtung an?

*Lösung:* Nach dem bisher Gesagten erwarten wir, dass in mechanischen Leitern Impuls strömt.

Zunächst vereinbaren wir: Der Impuls eines Wagens, der nach rechts fährt, hat einen positiven Wert. Ein ruhender Wagen trägt den Impuls  $0 \text{ Hy}$ . Fährt der Wagen nach links, so gilt  $p < 0 \text{ Hy}$ .

Zu Beginn ruht die oben abgebildete Schülerin auf dem Skateboard, ihr Impuls ist also  $p = 0 \text{ Hy}$ .

Was passiert, wenn die zweite Schülerin an der Stange drückt? Das Skateboard fährt nach rechts, nach der obigen Definition gilt dann  $p > 0$  Hy. Impuls ist also von der linken Schülerin durch die Stange in die Schülerin auf dem Skateboard hinein geflossen.

Was passiert, wenn sie an der Stange zieht? Die Schülerin auf dem Skateboard fährt nach links und nach Definition ist dann  $p < 0$  Hy. Impuls ist also aus ihr heraus und durch die Stange nach links geflossen.

Die Experimente legen folgende Regel nahe: Steht die Stange in der obigen Abbildung unter Druckspannung, dann fließt der Impuls nach rechts. Steht die Stange unter Zugspannung, dann fließt der Impuls nach links.

Man mache sich klar, dass man zum gleichen Ergebnis kommt, wenn die zweite Schülerin sich rechts befindet und von dort mit einer Stange drückt oder an einer Stange zieht.

### M3 Dioden in der Mechanik?



Was ist eine Diode? Durch sie kann der elektrische Strom nur in eine Richtung fließen. In diesem Sinne ist auch das Ventil am Fahrradschlauch eine Diode, allerdings für Luftströme. Gibt es auch Dioden für Impulsströme? Untersuche daraufhin die nebenstehenden Bilder.

*Lösung:* Am Seil kann nur gezogen werden. Durch das Seil fließt der Impuls immer nach links. Das Seil ist eine Impulsdiode.

### M4 Das Impulsleck des Fahrradfahrers



Carolin tritt in die Pedale. Ab geht die Post, Carolin wird schneller und schneller. Ihr Impuls nimmt zu. Wie kommt der Impuls ins Fahrrad?

Carolins Tacho zeigt 30 km/h. Carolin strampelt immer noch, die Tachoanzeige bleibt aber bei 30 km/h stehen. Wie kann das sein?

Plötzlich ist die Ampel rot! Carolin bremst. Wie wird sie ihren Impuls wieder los?

*Lösung:* Solange Carolin noch beschleunigt, nimmt ihr Impuls zu. Carolin weiß, dass der Impuls sich nicht von selbst in ihr anhäuft. Sie muss den Impuls durch das Treten der Pedale aus

der Erde (Stelle tiefer Geschwindigkeit) in das Fahrrad (Stelle hoher Geschwindigkeit) pumpen.

Bei  $v = 30 \text{ km/h}$  ist ein Fließgleichgewicht erreicht: wegen des Luftwiderstands strömt genau so viel Impuls pro Sekunde in die Luft ab wie Carolin in das Fahrrad hineinpumpt.

Beim Bremsen wird durch die Reibung zwischen Bremsklotz und Felge eine Impulsleitung geschlossen. Dieser „Bypass“ umgeht den Impulsisolator Kugellager, so dass der Impuls von selbst aus dem Fahrrad (Stelle hoher Geschwindigkeit) in die Erde (Stelle tiefer Geschwindigkeit) strömen kann.

### M5 Von Sicherheitsgurten und Airbags



Oh weh', oh weh', wenn ich auf das Ende seh'. Paul und sein neuer Führerschein sind unterwegs. So schnell sie können – unangeschnallt. Kein Gedanke an das, was passieren könnte.

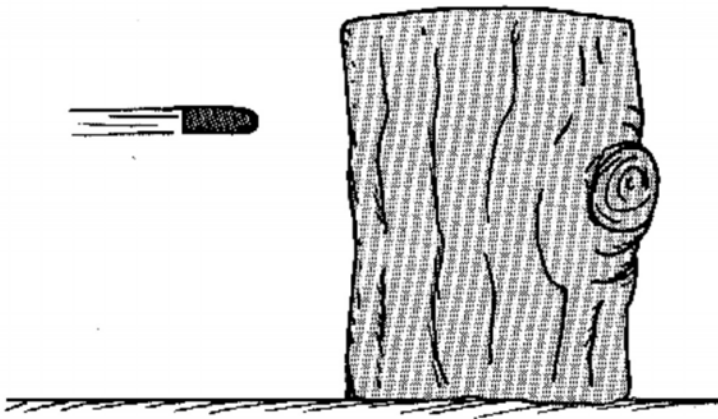
Erkläre mit Hilfe des Impulses, was unserem Modellfahrer und seinem Auto in Kürze passieren wird.

Erkläre die Aufgaben von Sicherheitsgurt und Airbag.

Auf welche Eigenschaften dieser Sicherheitskomponenten kommt es an?

*Lösung:* Das Auto wird seinen Impuls über die Mauer an die Erde abgeben. Dem Auto wird man nachher die Stellen, durch die ein besonders großer Impulsstrom geflossen ist, ansehen. Paul wird zunächst seinen Impuls behalten, ihn dann über die Windschutzscheibe oder die Mauer in die Erde ableiten. Auch ihm wird man die Stellen ansehen, an denen besonders große Impulsströme geflossen sind.

Die Impulsstromstärke  $F = p / t$  wird klein, wenn  $t$  groß wird. Das erreicht Paul durch einen elastischen Gurt oder Airbag. Außerdem wird Paul darauf achten, dass sich der Impulsstrom auf eine möglichst große Fläche verteilt. Deshalb sind elegante schmale Sicherheitsgurte nicht erhältlich.

**M6 Einfach umwerfend**

Womit wirfst Du den Holzklotz am ehesten um? Mit einer Gummikugel oder einer Stahlkugel? Beide Kugeln haben gleiche Masse und Geschwindigkeit. ( $m = 40 \text{ g}$ ,  $v = 800 \text{ m/s}$ )

*Lösung:* Beide Kugeln enthalten den Impuls  $p = m \cdot v = 32 \text{ Hy}$ . Die Stahlkugel bohrt sich in den Holzklotz,  $32 \text{ Hy}$  werden durch den Holzklotz in den Boden abgeleitet. Die Gummikugel hingegen reflektiert am Holzklotz und fliegt mit  $-32 \text{ Hy}$  in die Gegenrichtung. Durch den Holzklotz fließt jetzt doppelt so viel Impuls in den Boden.

Fazit: Mit der Gummikugel geht's wohl besser.

**M7  $F = p / t$  auf dem Prüfstand**

Versuchsaufbau und Messung:

Der Gleiter ( $m_1 = 108 \text{ g}$ ) und eine beschleunigende Masse ( $m_2 = 2,8 \text{ g}$ ) sind durch einen Faden über eine Rolle verbunden. Die Lichtschranke misst die Fahrzeit  $t_1 = 2,26 \text{ s}$  und die Dunkelzeit  $t_2 = 43,86 \text{ ms}$ . Die Fähnchenbreite ist  $s = 2,5 \text{ cm}$

Überprüfe damit die Formel  $F = p / t$ .

*Lösung:* Aus dem Gravitationsfeld fließt der Impulsstrom  $F = m_2 \cdot g = 27,6 \text{ mN}$  in die beschleunigende Masse. Ein Teil des zuströmenden Impulses bleibt in  $m_2$  hängen, der Rest fließt weiter zum Gleiter.

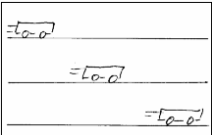
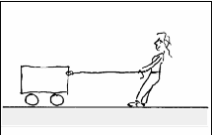
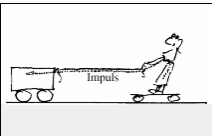
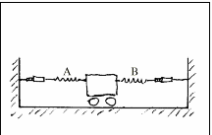
Das Experiment liefert folgende Zahlenwerte:

$$p = (m_1 + m_2) \cdot v = 63,2 \text{ mHy} \Rightarrow F = p / t = 27,9 \text{ mN}, \text{ relativer Fehler: ca. } 1\%$$

**M8 Die Newton'schen Axiome und das Kräftegleichgewicht in der Impuls- und in der Kraftsprache**

Gleiche Phänomene lassen sich in unterschiedlichen Sprachen darstellen. Je nachdem, ob wir die traditionelle Kraftsprache oder die hier verwendete Impulssprache verwenden, entstehen unterschiedliche Anschauungen.

Eine Größe mit zwei Namen: Impulsstromstärke = Kraft

|   | <i>Impulssprache</i>  | <i>Kraftsprache</i>  |
|---|---|--|
| 1. Newtonsches Gesetz: Trägheitssatz<br>     | Der Wagen behält seinen Impuls, wenn Impuls weder zufließt noch abfließt.   | Wenn keine Kraft auf den Wagen wirkt, dann fährt er mit konstanter Geschwindigkeit.  |
| 2. Newtonsches Gesetz: Aktionsprinzip<br>    | Der Mensch pumpt Impuls in den Wagen.<br>Der Impuls des Wagens nimmt zu ( $F = p/t = m \cdot v/t$ ).  | Der Mensch übt auf den Wagen eine Kraft aus.<br>Dadurch wird der Wagen beschleunigt ( $F = m \cdot a$ ).   |
| 3. Newtonsches Gesetz: actio = reactio<br> | Der Impuls, der aus dem Menschen herausströmt, strömt in den Wagen hinein.<br>Deshalb hat der Impuls des Menschen am Ende einen negativen Wert, der des Wagens einen entsprechenden positiven Wert. | Der Mensch übt auf den Wagen eine Kraft aus, deshalb fährt der Wagen nach rechts.<br>Der Wagen übt auf den Menschen eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft aus. Deshalb fährt der Mensch nach links. |
| Kräftegleichgewicht<br>                    | In den Wagen fließen pro Sekunde 3 Hy hinein, die aber auch gleich wieder herausfließen.<br>Der Impuls des Wagens bleibt daher 0 Hy.  | Der Wagen wird mit $F = 3N$ in entgegengesetzte Richtungen gezogen. Er befindet sich im Kräftegleichgewicht und bleibt in Ruhe.  |

**M9 Fließgleichgewichte**



a) In ein zunächst leeres Wasserfass mit der Querschnittsfläche  $500 \text{ cm}^2$  fließt ein Wasserstrom von  $5000 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Am Boden des Wasserfasses befindet sich ein Abfluss. Da der Wasserdruck am Boden des Fasses vom Wasserstand abhängt, fließt durch das Loch umso mehr Wasser, je mehr Wasser sich im Fass befindet. Der Zusammenhang zwischen dem Wasserstand und dem Wasserstrom ist

$$\text{Wasserstrom} = 50 \cdot \text{Wasserstand im Fass}$$

Simuliere das Problem mit Dynasys

- (1) Wie viel Wasser ist nach 1 s, 2 s, 10 s im Fass?
- (2) Nach 50 s ändert sich der Wasserstand im Fass nur noch geringfügig. Wie viel Wasser ist nach dieser Zeit im Fass und wie hoch ist der Wasserstand?
- (3) Vergleiche den Wasserabfluss nach 50 s mit dem Wasserzufluss.
- (4) Warum steigt der Wasserstand nicht über 100cm?

b) Du fährst Fahrrad. Dabei pumpst Du Impuls aus der Erde in das Fahrrad und wirst dabei erwartungsgemäß immer schneller. Doch bei ca. 30 km/h ist Schluss. Obwohl Du immer noch genau so viel Impuls in das Fahrrad pumpst, nimmt Deine Geschwindigkeit nicht weiter zu.

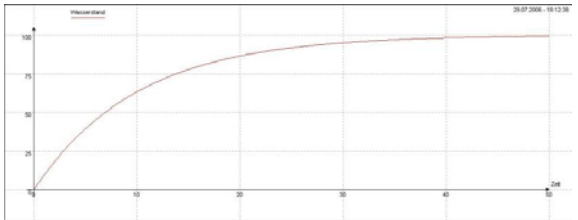
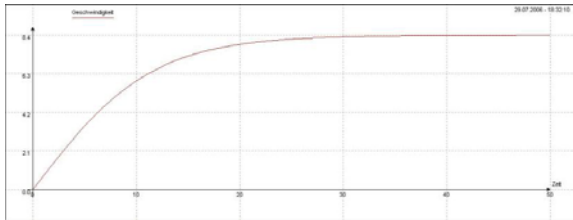
Erkennst Du die Analogie zu Aufgabenteil a)? Wo ist der Impulsabfluss?

Simuliere das Problem mit Dynasys. Bestimme die Grenzgeschwindigkeit bei  $F_{\text{Pumpe}} = 44 \text{ N}$  (Luftreibung  $F = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A \cdot v^2$ ;  $c_w \approx 1$ ;  $A \approx 1 \text{ m}^2$ ;  $\rho_{\text{Luft}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ;  $m_{\text{gesamt}} = 60 \text{ kg}$ )

*Lösung:* In beiden Fällen ist der Zustrom konstant, der Abstrom vom Füllstand abhängig.

|   |   |
|---|---|
|   |   |
| <p>Zustandsgleichungen<br/> <math>\text{Volumen.neu} \leftarrow \text{Volumen.alt} + dt \cdot (\text{Zufluss} - \text{Abfluss})</math><br/>                 Startwert Volumen = 0</p> | <p>Zustandsgleichungen<br/> <math>p.\text{neu} \leftarrow p.\text{alt} + dt \cdot (F_{\text{Pumpe}} - \text{Luftreibung})</math><br/>                 Startwert p = 0</p> |



|  |   |
|--|---|
| <p>Zustandsänderungen<br/>         Zufluss = 5000<br/>         Abfluss = 50*Wasserstand</p> <p>Konstanten<br/>         Querschnittsfläche = 500</p> <p>Zwischenwerte<br/>         Wasserstand = Volumen/Querschnittsfläche</p> | <p>Zustandsänderungen<br/> <math>F_{\text{Pumpe}} = 44</math><br/>         Luftreibung =<br/> <math>0,5 * \text{Dichte\_Luft} * \text{Fläche} * c_w * \text{Geschwindigkeit} * \text{Geschwindigkeit}</math></p> <p>Konstanten<br/> <math>c_w = 1</math><br/>         Masse = 60<br/> <math>\text{Dichte\_Luft} = 1,25</math><br/>         Fläche = 1</p> <p>Zwischenwerte<br/>         Geschwindigkeit = <math>p/\text{Masse}</math></p> |
|   |   |

### M10 Senkrechte Bewegungen



Das Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept haben wir am Beispiel von horizontalen Bewegungen entwickelt. Selbstverständlich trägt das Konzept auch bei vertikalen Bewegungen. In diesem Fall muss der Impulsleiter Gravitationsfeld mitberücksichtigt werden.

Die Aufgaben M10 und M11 vermitteln davon einen Eindruck.

Zunächst verfahren wir analog zu den horizontalen Bewegungen und vereinbaren:

Körper bewegt sich nach unten  $\Leftrightarrow p > 0 \text{ Hy}$

Körper bewegt sich nach oben  $\Leftrightarrow p < 0 \text{ Hy}$

a) Beschreibe den freien Fall mit Hilfe der Größe Impuls

b) Wie fließt der Impuls in der nebenstehenden Abbildung?

*Lösung:* Der fallende Gegenstand wird immer schneller. Impuls fließt offenbar über das Gravitationsfeld in den Gegenstand. In der Abbildung fließt der Impuls durch das Gravitationsfeld in den Gegenstand hinein und über das Seil gleich wieder hinaus.

### M11 Der Fallschirmsprung



a) Der Fall eines Fallschirmspringers ( $m = 75 \text{ kg}$ ) soll untersucht werden. Zunächst behandeln wir den Fall unter der absolut unrealistischen Annahme, dass es sich um einen freien Fall handelt.

Welche Geschwindigkeit hat der Fallschirmspringer nach 10 s?

Was passiert, wenn der Fallschirmspringer nach 10 s die Reißlinie zieht? (Annahme: Fall im Vakuum!!)

b) Jetzt betrachten wir den Fallschirmabsprung realistisch, wir berücksichtigen den Luftwiderstand.

Leite eine Formel für die Grenzgeschwindigkeit beim Fallen her.

Welche Größen in der Formel ändern ihren Wert, wenn nach 10 s die Reißleine gezogen wird?

Skizziere das  $v$ - $t$ -Diagramm im Bereich  $0 \text{ s} \leq t \leq 14 \text{ s}$ .

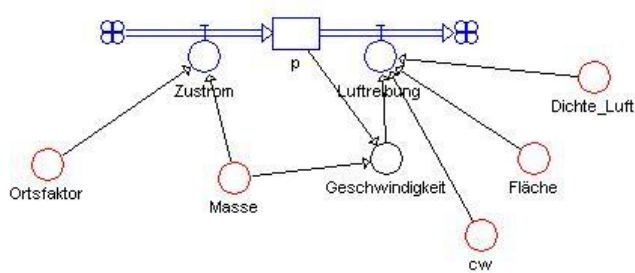
Dein Freund, der doppelt so viele kg auf die Waage bringt, schwebt am Fallschirm neben dir. Kommt ihr gleichzeitig unten an? (Begründung)

c) Erstelle ein Modell zur Simulation des Falls in Luft mit Dynasys. Fläche Fallschirm  $12,5 \text{ m}^2$ , Fläche Springer  $0,5 \text{ m}^2$ ,  $c_w \text{ Schirm} = 6$ ,  $c_w \text{ Springer} = 1$

*Lösung:*

Freier Fall:  $F = p / t = m \cdot v / t = m \cdot g \Rightarrow v = g \cdot t = 100 \text{ m/s}$

Fallen mit Reibung: Die Grenzgeschwindigkeit wird erreicht, wenn über das Gravitationsfeld genau so viel Impuls zuströmt wie über die Luftreibung abströmt:  $F_{\text{Zustrom}} = F_{\text{Abstrom}}$ ;  $m \cdot g = 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A \cdot v^2 \Rightarrow v = 4 \text{ m/s}$ .



## Zustandsgleichungen

```
p.neu <-- p.alt + dt*(Zustrom-Luftreibung)
Startwert p = 0
```

## Zustandsänderungen

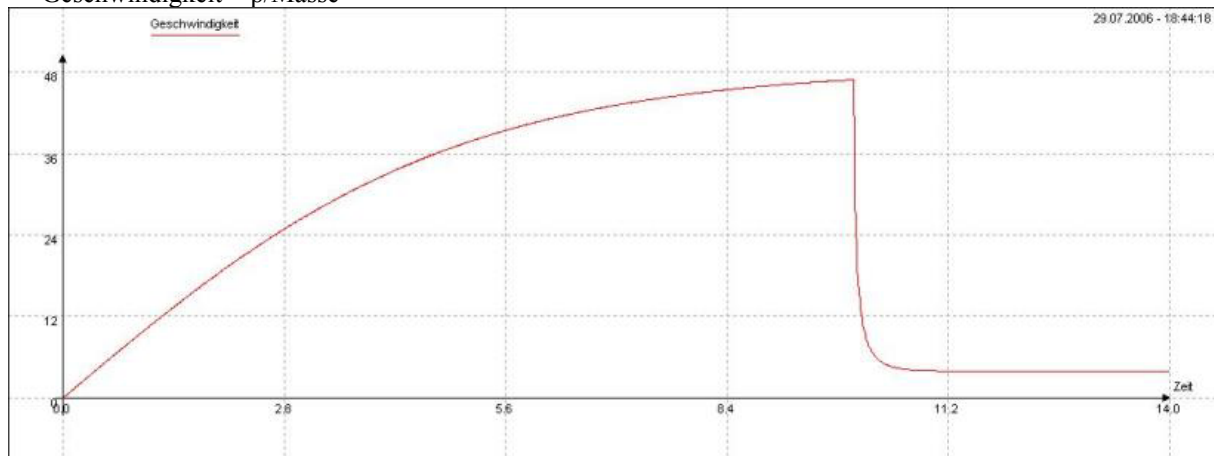
```
Zustrom = Masse*Ortsfaktor
Luftreibung = 0,5*Dichte_Luft*Fläche*cw*Geschwindigkeit*Geschwindigkeit
```

## Konstanten

```
cw = Wenn(Zeit>10;6;1)
Masse = 75
Dichte_Luft = 1,25
Fläche = Wenn(Zeit>10;12,5;0,5)
Ortsfaktor = 9,81
```

## Zwischenwerte

```
Geschwindigkeit = p/Masse
```



Die oben dargestellte Lösung modelliert die Verhältnisse bei einem Rundkappenfallschirm. Als Personenfallschirm ist dieser traditionelle Fallschirmtyp inzwischen weitgehend vom Flächen- oder Gleitfallschirm verdrängt worden. Bei Flächenfallschirmen treten zusätzlich noch Auftriebskräfte auf.

## M12 Die Wasser-Luft-Rakete



Wer schießt die Rakete am höchsten? Sollte sie möglichst viel Wasser enthalten? Oder nur Luft?

Kannst Du Deine Beobachtungen mit Hilfe der Größe Impuls erklären?

*Lösung:* Vor dem Start ist der Impuls der Rakete  $0 \text{ Hy}$ . Nach dem Start bewegt sich das Luft-Wassergemisch nach unten, z. B. mit dem Impuls  $0,3 \text{ Hy}$ . Also hat die Rakete den Impuls  $-0,3 \text{ Hy}$ , sie bewegt sich nach oben. Wird die Rakete nur mit Luft betrieben, ist der Impuls der austretenden Luft wegen der geringeren Masse kleiner. Hinweis: den Schülern wird das Verständnis u. U. durch eine horizontale Anordnung erleichtert.

## 6.4. Wärmelehre

### W1 Der Saunaausstatter



Wohin sollen wir die Brillenablage für die Sauna hängen? In die Sauna, vor die Sauna, oder spielt das keine große Rolle?

In der Sauna findet man immer Holzbänke. Ist das nicht langweilig? Wie wär's mal mit einem schicken Bistrostuhl (die sind i. a. aus Metall)?

*Lösung:* In einem Vorversuch sollen die Schüler ein Holzstück und eine Metallstange aus der Sammlung in die Hand nehmen. Viele Schüler meinen, die Temperatur der Metallstange sei tiefer als die des Holzes. Die Temperaturmessung widerlegt die Vermutung. Einige Schüler verweisen dann auf die soeben erarbeitete Regel, wonach alle Gegenstände, die sich lange genug im Zimmer befinden, gleiche Temperatur haben sollten.

Die Brillenablage muss außerhalb der Sauna aufgehängt werden. Andernfalls würden wir uns beim Aufsetzen der Brille verbrennen. Die Brille befindet sich auf der hohen Saunatemperatur, unsere Körpertemperatur beträgt  $37^{\circ}\text{C}$ . Also: großer Antrieb, großer Entropiestrom. Und auch hier gilt: hohe Stromstärken tun weh.

Aber das gilt doch auch für die Holzbank in der Sauna? Holz ist im Gegensatz zu Metall ein schlechter Wärmeleiter. An der Berührstelle fließt zwar Entropie aus der Bank in den Körper, da aber keine Entropie aus der Bank an die Berührstelle nachfließen kann, sinkt die Temperatur des Holzes an der Berührstelle nach unserer Regel auf  $37^{\circ}\text{C}$ . Die Entropie hört auf zu strömen. Deshalb: kein Birstuhl in der Sauna.

Warum sie ihr Gefühl bei der Temperaturschätzung getäuscht hat, ist den Schülern nun klar?

## W2 2. Hauptsatz



Dass die Größe Ladung eine Erhaltungsgröße ist, ist offenbar nicht sonderlich erwähnenswert. Die Ladungserhaltung wird i. a. wie eine Selbstverständlichkeit vorausgesetzt. Wenn die Ladung eines Gegenstandes abnimmt, dann muss diese Ladung anderswo wieder auftauchen.

Entsprechend verfahren wir in der Mechanik mit der Größe Impuls. Wenn beim Stoß zweier Körper der Impuls des einen abnimmt, dann taucht der fehlende Impuls im zweiten Körper wieder auf. Ist Reibung im Spiel oder existiert eine andere Impulsleitung zur Erde, dann verteilt sich der Impuls auf die Körper und die Erde.

Verhält es sich bei der Entropie genau so?

Wir betrachten eine brennende Kerze. Halten wir die Hand über die Flamme, wird schnell klar: Aus der Flamme strömt Entropie. Doch wo kommt die Entropie her?

Wir betrachten eine leuchtende Glühbirne. Handauflegen führt wieder zur gleichen Feststellung und Frage wie bei der Kerze.

*Lösung:*

Wir müssten die Entropiequelle daran erkennen, dass der Gegenstand an dieser Stelle abkühlt. Doch weder der Kerzenfuß wird kalt, die Batterie im elektrischen Stromkreis auch nicht und auch sonst kühlt nirgendwo etwas ab. Entsprechende Beobachtungen können an vielen Beispielen immer wieder auf's Neue gemacht werden: Beim Herabrutschen an der Kletterstange werden die Hände heiß, aber nirgendwo wird etwas kalt,...

Zur Erklärung bleibt nur der Satz: Im Gegensatz zu Impuls und Ladung kann die Entropie erzeugt werden.

Kann die Entropie auch vernichtet werden? Natürlich kann man leicht Beispiele finden, bei denen sich ein Gegenstand abkühlt, ohne dass sich ein anderer erhitzt. Z.B. die Tasse Kaffee, die man stehen lässt. Aber die Schüler merken sofort, dass die Entropie hier nicht vernichtet

wird. Solange eine Temperaturdifferenz besteht, strömt die Entropie aus dem Kaffee in die Atmosphäre. Da diese aber so groß ist, erhöht sich dabei ihre Temperatur nicht merklich. (→ Entropieerdung)

Fazit der Diskussion ist der 2. Hauptsatz:

Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

### W3 Kann die Zeit auch rückwärts laufen?



Aus einem Häufchen Wachs entsteht eine schöne Flamme. Im weiteren Verlauf des Films wächst das Häufchen Wachs zu einer großen, schlanken Kerze. Klar, das gibt es nicht, der Film läuft rückwärts.

Im zweiten Film fliegt ein Ball von links nach rechts durch das Bild. Läuft der Film vorwärts oder rückwärts?

*Lösung:*

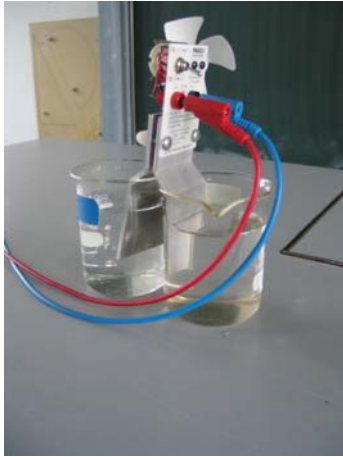
Beim ersten Film ist sofort klar: der Film läuft rückwärts. In der Natur kann aus einem Häufchen Wachs keine Kerze erwachsen. Das Abbrennen der Kerze ist ein Vorgang, der nicht umkehrbar ist. Der Vorgang ist irreversibel.

Beim zweiten Film sind wir unsicher. Egal, in welcher Richtung wir den Film abspielen, der Vorgang könnte so ablaufen. Der Vorgang scheint umkehrbar, reversibel zu sein.

Warum sind manche Vorgänge reversibel, andere aber nicht? Beim Abbrennen der Kerze wird viel Entropie erzeugt. Läuft der Film rückwärts, so wäre das im Widerspruch zum 2. Hauptsatz ein Vorgang, bei dem Entropie vernichtet wird. Geht nicht!

Beim Vorbeifliegen des Balls hingegen wird kaum Entropie erzeugt, also hat weder unser Gefühl noch der 2. Hauptsatz ein Problem mit der Umkehrung des Vorgangs.

#### W4 Heizung ist nicht gleich Heizung



Im Winter ist es draußen kalt. Ob wir wollen oder nicht: die Entropie strömt uns wegen der Temperaturdifferenz durch die Wände aus dem Zimmer nach draußen. Soll es im Zimmer warm bleiben, müssen wir die nach draußen geströmte Entropie ersetzen, wir müssen heizen.

Du kannst Kohle, Öl, Holz oder Gas verbrennen.

Man kann aber auch mit einer Wärmepumpe heizen. Eine kleine Modellwärmepumpe gibt es in Deiner Physiksammlung (vgl. Abbildung) oder Du betrachtest die Wärmepumpe im Kühlschrank.

Mache Dich zunächst mit der Modellwärmepumpe vertraut. Erkläre den grundsätzlichen Unterschied zwischen dem Heizen durch Verbrennen und dem Heizen mit einer Wärmepumpe.

Beim Heizen mit einer Wärmepumpe gibt es verschiedene Methoden. Kannst Du Dir durch eine Internetrecherche einen groben Überblick verschaffen?

Auf manchen Häusern fallen Dir Sonnenkollektoren auf. Was haben die eigentlich mit Entropie zu tun?

Falls gerade Sommer ist: Was hat die Klimaanlage mit dem Heizungsproblem zu tun?

*Lösung:*

Die Wärmepumpe pumpt Entropie von Stellen tiefer Temperatur zu Stellen hoher Temperatur. Jede Wärmepumpe hat einen Entropieeingang und einen Entropieausgang, die beim Heizen natürlich richtig positioniert werden müssen. Außerdem müssen wir jede Wärmepumpe mit (z.B. elektrischer) Energie versorgen.

Beim Verbrennen wird die benötigte Entropie erzeugt. Welche Art zu heizen ist günstiger? Das klären wir, sobald wir den Zusammenhang zwischen Entropie und Energie besprochen haben.

Wenn Licht auf einen schwarzen Gegenstand trifft, dann wird das Licht absorbiert und der Gegenstand wird heiß. Das merken wir, wenn im Sommer die Sonne auf den Asphalt brennt. Offenbar wird auch beim Sonnenkollektor Entropie erzeugt.

**W5 Wann ist die Flasche leer?**

Was heißt eigentlich leer? Je nachdem, um welchen Gegenstand es sich handelt, wirst Du die Frage anders beantworten.

Bevor Du zu drehen beginnst, sind beide Konduktorkugeln der Influenzmaschine ungeladen:  $Q = 0 \text{ C}$ . Sind die Kugeln leer an Ladung?

Wenn das Auto steht, enthält es den Impuls  $p = 0 \text{ Hy}$ . Ist das Auto leer an Impuls?

Wenn wir im Kühlschrank Entropie aus den Lebensmitteln pumpen, sind die Lebensmittel irgendwann leer an Entropie?

*Lösung:*

Wir drehen die Kurbel der Influenzmaschine. Ladung wird aus der einen Kugel in die andere Kugel gepumpt. Die Ladung der einen Kugel hat einen negativen Wert, die Ladung der anderen Kugel einen positiven Wert. Fazit: Der Begriff „leer“ ergibt hier keinen rechten Sinn, da die Größe Ladung auch negative Werte annehmen kann.

Ein Auto rollt aus bis es steht. Ist bei  $p = 0 \text{ Hy}$  wirklich Schluss? Es könnte nun rückwärts fahren, dann hätte der Impuls des Autos einen negativen Wert.

Fazit: Wie oben bei der Ladung macht auch beim Impuls der Begriff „leer“ keinen Sinn, da auch der Impuls negative Werte annehmen kann.

Ist das bei der Entropie auch so? Mit den besten Kühlschränken (Kältemaschinen) pumpen wir Entropie aus verschiedenen Gegenständen. Erwartungsgemäß sinkt die Temperatur. Doch bei  $-273 \text{ °C}$  ist Schluss. Obwohl die Wärmepumpe weiterläuft, sinkt die Temperatur nicht weiter. Egal aus welchen Gegenständen die Entropie gepumpt wird, egal von welcher Firma die Kältemaschine stammt.

Diese Beobachtungen legen den 3. Hauptsatz nahe:

Bei  $\vartheta = -273 \text{ °C}$  ( $T = 0 \text{ K}$ ) ist alle Entropie aus den Gegenständen gepumpt ( $S = 0 \text{ Ct}$ )  
Die Entropie kann keine negativen Werte annehmen.



**W6 Wie baut man einen Heizkörper?**

Im Bild siehst Du einen Rippenheizkörper, wie er früher in fast allen Wohnungen anzutreffen war. Welche Überlegungen spielen beim Bau eines Heizkörpers eine Rolle? Wie kannst Du Dir helfen, wenn in einem sehr kalten Winter der Heizkörper es nicht mehr schafft, das Zimmer zu heizen? Vergleiche den Rippenheizkörper mit Heizkörpern heutiger Bauart. Falls ihr eine Fußbodenheizung besitzt: Vergleiche die Temperatur des Wassers in der Fußbodenheizung mit der Temperatur des Wassers in den Heizkörpern.

*Lösung:*

Kleiner Widerstand durch große Oberfläche (Metallbleche bei modernen Radiatoren), geeignetes Material (Metall), kleine Wandstärken.

Der Entropiestrom kann aber auch durch einen größeren Antrieb erhöht werden. Dazu wird die Kesseltemperatur erhöht.

**W7 Warum hat der Elefant so große Ohren?**

So ein Ohr eines Afrikanischen Elefanten kann ohne weiteres  $2 \text{ m}^2$  groß werden. Braucht der Elefant so große Ohren, damit er besser hören kann?

Der Elefant braucht so große Ohren, damit er keinen Hitzschlag bekommt. Kannst Du das erklären?

*Lösung:*

Im Körper eines Lebewesens wird ständig Entropie erzeugt. Damit die Körpertemperatur konstant bleibt, muss also ständig Entropie über die Körperoberfläche abgegeben werden.

Wenn wir annehmen, dass jedes kg Körpermasse gleich viel Entropie erzeugt, dann kommt bei dem Elefanten ganz schön was zusammen. Aber so ein Elefant hat ja auch viel Körperoberfläche?

Um das Problem abschätzen zu können, stellen wir uns die Lebewesen vereinfacht als Würfel vor. Vom Würfel (Kantenlänge  $a$ ) wissen wir nämlich:  $V = a^3$  und  $O = 6a^2$ . Also steigt das Volumen der großen Tiere viel stärker an als ihre Oberfläche. Deshalb kann die Maus getrost auf große Ohren verzichten.

### W8 Warum plustern sich Vögel im Winter auf?



Vögel sind kleiner als Elefanten. Sie haben im Winter genau das entgegengesetzte Problem. Warum hilft Aufplustern?

*Lösung:*

Bei großer Differenz zwischen der Körpertemperatur und der Außentemperatur (= großer Antrieb) muss der Wärmewiderstand erhöht werden. Die Luft zwischen den Federn ist ein schlechter Wärmeleiter.

Betrachte die Härchen auf Deiner Haut, wenn Du aus dem Schwimmbecken kommst und der Wind bläst.

### W9 Ohne Kühlung kommt der Kolbenfresser



Wenn die im Automotor erzeugte Entropie nicht entsorgt werden kann, dann droht Kolbenfresser. Wenn im Kernkraftwerk die erzeugte Entropie nicht entsorgt werden kann, dann droht der GAU. Wenn die in Deinem Körper erzeugte Entropie nicht entsorgt wird, dann droht der Hitzschlag.

Hast Du eine Chance, wenn während der Hundstage die Außentemperatur  $37^\circ\text{C}$  übersteigt?

*Lösung:*

Die Entropie kann eigentlich nicht mehr aus dem Körper in die Luft strömen, da die Außentemperatur höher als die Körpertemperatur ist. Also muss eine andere Methode her, um die Entropie los zu werden. Dazu erzeugen wir mit einem Tauchsieder Entropie und messen die Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit. Bei  $100^{\circ}\text{C}$  steigt die Wassertemperatur nicht weiter, obwohl dem Wasser ständig weiter Entropie zugeführt wird. Offenbar wird jetzt die Entropie nicht mehr zur Temperaturerhöhung verwendet, sondern um Wasser aus der flüssigen Phase in die gasförmige Phase zu transformieren. Verdampft wird Wasser aber nicht nur beim Sieden, sondern auch beim Verdunsten. Der hohe Entropiebedarf wird einfach der Umgebung entzogen. Das spüren wir, wenn bei feuchter Haut der Wind weht, oder wenn wir Kölnisch Wasser auf die Haut spritzen.

**W10 Wie funktioniert die Thermoskanne?**

Im Winter hält die Thermoskanne den Kaffee warm, im Sommer den Eistee kalt. Woher weiß die Thermoskanne, wann Sommer und wann Winter ist?

*Lösung:*

Wegen des Antriebs strömt im Winter die Entropie aus der Kanne, im Sommer in die Kanne. Den Entropiestrom versucht man zu minimieren durch einen möglichst großen Widerstand. Im Innern der Kanne ist der Zwischenraum evakuiert und die Doppelwand wird durch Korkstücke abgestützt. Vakuum ist ein Entropieisolator, Kork ein schlechter Entropieleiter.

Warum ist aber das Glasgefäß im Innern der Kanne verspiegelt? Entropie kann nicht nur durch Wärmeleitung, sondern auch durch Wärmestrahlung wegtransportiert werden. Das erleben wir jede Nacht, wenn sich der Boden abkühlt. Die Entropie wird mit der Wärmestrahlung in das Weltall abgestrahlt. In der Thermoskanne wird die Wärmestrahlung an der Wand zurück in den Kaffee gespiegelt.

**W11 Wie schnell kühlt der Tee ab? (Heimexperiment)**

Wir füllen ein Gefäß mit heißem Wasser und starten das Heimexperiment mit verschiedenen Starttemperaturen. Gemessen wird die Abkühlung des Wassers nach 5 Minuten. Ist die Temperaturänderung immer gleich? Kannst Du das erklären?

*Lösung:*

Je größer der Antrieb desto größer die Entropiestromstärke. Je größer die Entropiestromstärke desto mehr Entropie ist nach 5 min aus dem Wasser herausgeflossen.

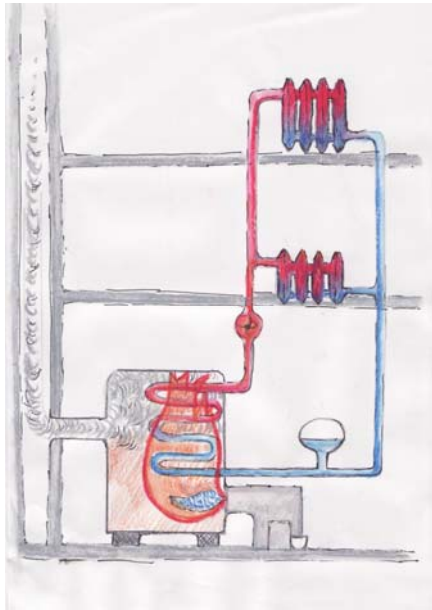
**W12 Da hilft nur ein Klimagerät**

An heißen Tagen hat der Baumarkt schnell reagiert: Gleich am Eingang wird eine große Zahl von Klimageräten angeboten. Deine Eltern kaufen ein solches Gerät. Beim Aufstellen zu Hause finden sie in der Packung einen Abluftschlauch, den man an das Klimagerät anschließen und aus dem Fenster hängen soll. Das finden Deine Eltern hässlich und unpraktisch. Sollen sie das Gerät ohne Schlauch in Betrieb nehmen?

*Lösung:*

Das Klimagerät muss die Entropie aus dem Zimmer hinaus pumpen. Ohne Abluftschlauch wird die Entropie gleich wieder in das Zimmer abgegeben. Und da solche Geräte immer auch noch Entropie erzeugen, nimmt die Entropie im Zimmer sogar noch zu und es wird noch heißer.

**W13 Wie die Wärme ins Wohnzimmer kommt.**



Geh mal in den Keller. Dort sollte sich der Brenner eurer Heizungsanlage befinden. Wie kommt eigentlich die Wärme von dort ins Wohnzimmer?

*Lösung:*

Brenner → Kessel: Wärmeleitung (Kurzstrecke)

Kessel → Heizkörper: Konvektion (Langstrecke)

Heizkörper → Zimmerluft: Wärmeleitung (Kurzstrecke)

Durch das Zimmer: Konvektion (Langstrecke)

## 7. Physikalische Grundlagen des „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzepts“

Um den Physikunterricht der Schule zu verbessern, ist es aus unserer Sicht notwendig, die Gemeinsamkeiten und Zusammenhänge zwischen scheinbar verschiedenen physikalischen Phänomenen und Fragestellungen deutlich zu betonen. Denn für den Erfolg eines Lernprozesses ist das Erkennen gemeinsamer Strukturen von besonderer Bedeutung, da der Mensch Einzelheiten viel schneller vergisst, wenn sie nicht in einen größeren Zusammenhang eingebettet sind. J. S. Bruner schreibt dazu in *Der Prozess der Erziehung* (Berlin-Verlag 1973): Das Verstehen einer Struktur bedeutet, „dass man nicht nur einen speziellen Sachverhalt erkannt hat, sondern auch ein Modell für das Verstehen anderer, ähnlicher Sachverhalte, denen man noch begegnen wird“. Ein erfolgreicher Physikunterricht muss daher eine begrifflich einheitliche Struktur der verschiedenen physikalischen Teilgebiete in den Mittelpunkt stellen.

### 7.1. Mengenartige Größen: Grundlage des „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“

So wie es in der Quantenmechanik üblich ist, kann man physikalische Vorgänge generell als Übergang eines physikalischen Systems von einem Zustand in einen anderen Zustand auffassen. Der Zustand des physikalischen Systems ist dabei durch die Werte der so genannten extensiven oder mengenartigen Größen festgelegt. Übergänge können dann durch den Austausch (anschaulich: Ströme) mengenartiger Größen beschrieben werden, wobei immer mindestens zwei mengenartige Größen ausgetauscht werden müssen.

Die mengenartigen Größen haben genau die Eigenschaften, die man aufgrund der Namengebung erwarten würde, und die jedem Menschen aus dem Alltag durch den Umgang mit verschiedenen „Stoffen“ vertraut sind<sup>19</sup>:

- Der Wert einer mengenartigen Größe  $X$  bezieht sich immer auf ein Raumgebiet. In diesem Raumgebiet ist  $X$  verteilt und man kann eine räumliche Dichte  $\rho_X$  bilden.
- Die mengenartige Größe  $X$  kann strömen; dabei bezieht sich die zugehörige Stromstärke  $I_X$  immer auf eine Fläche und man kann eine Stromdichte  $\vec{j}_X$  definieren.
- Man kann die mengenartige Größe  $X$  bilanzieren, d. h. man kann eine lokale Kontinuitätsgleichung aufstellen:

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} = \operatorname{div} \vec{j}_X + \sigma_X \quad (\text{II.1})$$

Hierbei ist  $\sigma_X$  die lokale Quelldichte der Größe  $X$ . Durch räumliche Integration und Anwendung des gaußschen Satzes erhält man daraus die integrale Form der Bilanzgleichung für ein festes Raumgebiet:

$$\frac{dX}{dt} = I_X + \Sigma_X \quad (\text{II.2})$$

Dabei ist  $dX/dt$  die zeitliche Änderung von  $X$  in diesem Raumgebiet,  $I_X$  die Stärke des  $X$ -Stromes in das Raumgebiet<sup>20</sup> und  $\Sigma_X$  die Erzeugungsrate. Man sieht: Der  $X$ -Inhalt des

<sup>19</sup> Jeder Schüler bringt Erfahrungen im Umgang mit verschiedenen mengenartigen Größen mit, z. B. mit der sehr konkreten Größe Wassermenge oder auch der abstrakteren Größe Geldmenge.

<sup>20</sup> Das Vorzeichen einer Stromstärke ist abhängig von der Orientierung der zugehörigen Fläche. Wie in den meisten Schulbüchern üblich, wurde hier die Orientierung der Oberfläche des Raumbereiches so gewählt, dass der Normalenvektor nach innen zeigt. Eine positive Stromstärke bedeutet also einen  $X$ -Strom in das Gebiet hinein.

Raumgebietes kann sich nur dadurch ändern, dass ein  $X$ -Strom in das Gebiet hinein- bzw. aus ihm heraus fließt, oder indem etwas von  $X$  erzeugt bzw. vernichtet wird.

Einige mengenartige Größen, wie z. B. Energie, Impuls, Drehimpuls und elektrische Ladung sind Erhaltungsgrößen. Das bedeutet, der Erzeugungsterm  $\Sigma_X$  verschwindet für alle diese Größen. Für die elektrische Ladung  $Q$  erhält man so aus (II.1) und (II.2) die beiden bekannten Gleichungen:

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} = \operatorname{div} \vec{j} \quad \text{und} \quad \frac{dQ}{dt} = I$$

Aber nicht alle mengenartigen Größen sind Erhaltungsgrößen. So kann z. B. die Stoffmenge sowohl erzeugt als auch vernichtet werden; Entropie kann erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Mengenartigkeit ist daher nicht gleichbedeutend mit Erhaltung. Allerdings ist die Menge der Erhaltungsgrößen eine echte Teilmenge der mengenartigen Größen, da es nur bei diesen bilanzierbaren Größen sinnvoll ist überhaupt nach der Erhaltung zu fragen.

Im Physikunterricht der Schule wird von all diesen mengenartigen Größen normalerweise nur die elektrische Ladung als mengenartig eingeführt. Der Umgang mit der elektrischen Ladung fällt den Schülern daher meist auch besonders leicht. Man kann von ihr sprechen, wie von einer Substanz (oder einem „Zeug“), von der eine gewisse Menge in einem Körper (genauer einem physikalischen System) enthalten ist. Die anderen mengenartigen Größen werden dagegen formal aus nicht-mengenartigen Größen abgeleitet, und bleiben dadurch unanschaulich. Tatsächlich kann man mit ihnen aber genauso umgehen, wie mit der elektrischen Ladung. Auch sie kann man modellhaft auffassen wie ein „Zeug“, das in einem Körper enthalten ist und in diesen Körper hinein- und aus ihm herausströmt.

Für viele Teilgebiete der Physik sind ganz bestimmte mengenartige Größen typisch: Für die Mechanik der Impuls, für die Elektrodynamik die elektrische Ladung und für die Thermodynamik die Entropie und die Stoffmenge. Stellt man diese mengenartigen Größen und ihre zugehörigen Ströme in den Mittelpunkt, kann man alle diese Bereiche formal gleichartig beschreiben.

Um diese einheitliche Struktur deutlich zu machen, betrachtet man die gibbssche Fundamentalförmung. Sie verknüpft die Änderung der Energie  $E$  eines Systems mit der Änderung anderer extensiver Größen  $X_1, X_2, X_3, \dots$  und hat die Form:

$$dE = \xi_1 \cdot dX_1 + \xi_2 \cdot dX_2 + \xi_3 \cdot dX_3 + \dots$$

Die gibbssche Fundamentalförmung zeigt, dass sich die Energie eines Systems nur ändern kann, wenn sich gleichzeitig der Wert mindestens einer anderen extensiven Größe ändert. Die  $\xi_i$  sind die zu den  $X_i$  energiekonjugierten intensiven Größen. Ersetzt man die  $X_i$  und  $\xi_i$  durch die üblichen Symbole der mengenartigen Größen und ihrer zugehörigen intensiven Größen ( $\vec{p}$  und  $\vec{v}$  für Impuls und Geschwindigkeit,  $\vec{L}$  und  $\vec{\omega}$  für Drehimpuls und Winkelgeschwindigkeit,  $Q$  und  $\varphi$  für elektrische Ladung und elektrisches Potenzial,  $S$  und  $T$  für Entropie und Temperatur,  $n$  und  $\mu$  für Stoffmenge und chemisches Potenzial sowie  $m$  und  $\phi$  für Masse und Gravitationspotenzial) erhält man:

$$dE = \vec{v} \cdot d\vec{p} + \vec{\omega} \cdot d\vec{L} + \varphi \cdot dQ + T \cdot dS + \mu \cdot dn + \phi \cdot dm + \dots$$

Gibt man jeder der mengenartigen Größen  $\vec{p}$ ,  $\vec{L}$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $n$ ,  $m, \dots$  einen festen Wert, so ist auch der Wert der Energie  $E$  festgelegt. Man erhält  $E$  als Funktion der mengenartigen Größen  $E(\vec{p}, \vec{L}, Q, S, n, m, \dots)$ . Diese Funktion charakterisiert das System vollständig und heißt Gibbsfunktion. Für die Ableitung nach der Zeit gilt:

$$\frac{dE}{dt} = \vec{v} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt} + \vec{\omega} \cdot \frac{d\vec{L}}{dt} + \varphi \cdot \frac{dQ}{dt} + T \cdot \frac{dS}{dt} + \mu \cdot \frac{dn}{dt} + \phi \cdot \frac{dm}{dt} + \dots$$

Beschränkt man sich auf Vorgänge, bei denen alle extensiven Größen erhalten sind und ihren Wert nur durch Zu- und Abstrom ändern, erhält man eine einfache Beziehung zwischen dem Energiestrom und den Strömen der anderen extensiven Größen:

$$P = \vec{v} \cdot \vec{F} + \vec{\omega} \cdot \vec{M} + \varphi I + T \cdot I_S + \mu I_n + \phi I_m + \dots$$

In der Gleichung wurden die üblichen Abkürzungen ( $P$  Energiestrom bzw. Leistung,  $\vec{F}$  Impulsstrom bzw. Kraft,  $\vec{M}$  Drehimpulsstrom bzw. Drehmoment,  $I$  elektrischer Strom,  $I_S$  Entropiestrom,  $I_n$  Stoffmengenstrom und  $I_m$  Massenstrom) verwendet. Die Gleichung ist eine Zerlegung des insgesamt in das System oder aus dem System fließenden Energiestroms.

Jeder Energiestrom ist mit dem Strom mindestens einer weiteren mengenartigen Größe verknüpft, im Unterricht werden diese anderen Größen als die Träger der Energie bezeichnet. Die intensiven Größen geben an, wie stark der Energieträger mit Energie beladen ist<sup>21</sup>. Einfach formuliert: *Energie fließt nie allein, sie braucht immer einen Träger.*

## 7.2. Das „Strom-Antriebs-Konzept“

Ist der Strom einer mengenartigen Größe dissipativ, d. h. mit Entropieerzeugung verbunden, so ist dieser Strom immer mit einem Gradienten der zugehörigen intensiven Größe verknüpft. Ist die Stromdichte  $\vec{j}_X$  der mengenartigen Größe  $X$  proportional zum Gradienten der zugehörigen intensiven Größe  $\xi$ , so lässt sich dieser Zusammenhang mit dem Proportionalitätsfaktor  $\sigma_X$ , der „ $X$ -Leitfähigkeit“, lokal so formulieren<sup>22</sup>:

$$\vec{j}_X = -\sigma_X \cdot \text{grad} \xi \quad (\text{II.3})$$

Die Gleichung drückt aus, dass der  $X$ -Strom stets von Stellen mit größerem Wert der intensiven Größe  $\xi$  zu Stellen mit kleinerem  $\xi$ -Wert fließt. Sie gilt für mengenartige Größen in unterschiedlichen physikalischen Teilgebieten. Beispiele dafür sind:

- Ein elektrischer Strom fließt von Stellen hohen zu Stellen niedrigen elektrischen Potentials.
- Ein Entropiestrom fließt von Stellen hoher zu Stellen niedriger Temperatur.
- Ein Impulsstrom fließt von Stellen hoher zu Stellen niedriger Geschwindigkeit.
- usw.

Oft betrachtet man nicht die lokale Form der Gleichung (II.3), sondern leitende Systeme, bei denen der  $X$ -Strom  $I_X$  durch jede Querschnittsfläche derselbe ist. Für solche Systeme kann man Gleichung (II.3) global formulieren:

$$I_X = G_X \cdot (\xi_2 - \xi_1) = \frac{1}{R_X} \cdot (\xi_2 - \xi_1) \quad (\text{II.4})$$

Hier ist  $I_X$  der Betrag des  $X$ -Stromes durch die Leitung mit dem Leitwert  $G_X$  (bzw. dem Widerstand  $R_X = 1/G_X$ ), der vom einen Anschluss der Leitung (auf dem hohen Potential  $\xi_2$ ) zum anderen Anschluss (auf dem niedrigeren Potential  $\xi_1$ ) fließt.

D. h. der Strom  $I_X$  der mengenartigen Größe ist in einem Widerstand mit einer Differenz  $\xi_2 - \xi_1$  der intensiven Größe verbunden. Genauso, wie es auch in der Theorie zur Thermodynamik irreversibler Prozesse üblich ist, wird dies im „Strom-Antrieb-Widerstands-Konzept“ ausge-

<sup>21</sup> Die Summanden auf der rechten Seite von Gleichung (II.8) werden üblicherweise als Energieformen bezeichnet, z. B. elektrische Energie ( $\varphi I$ ), Wärme ( $T \cdot I_S$ ) oder chemische Energie ( $\mu I_n$ ).

<sup>22</sup> Gleichung (II.3) entspricht im elektrischen Fall der lokalen Formulierung des ohmschen Gesetzes:  $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} = -\sigma \cdot \text{grad} \varphi$ . Dabei ist  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit und  $\vec{E} = -\text{grad} \varphi$  die elektrische Feldstärke.



nutzt um eine allgemeine Regel aufzustellen: *Eine Differenz der intensiven Größe ist ein Antrieb für einen Strom der zugehörigen mengenartigen Größe.*

Diese Regel impliziert einen kausalen Zusammenhang im Sinne von Ursache und Wirkung zwischen  $\xi$ -Differenz und  $X$ -Strom. Die  $\xi$ -Differenz ist der Antrieb, und damit die Ursache für den  $X$ -Strom, der wiederum als die Wirkung des Antriebes gesehen wird. Diese Einteilung in Ursache und Wirkung ist aus physikalischer Sicht vollkommen willkürlich, und kann nur didaktisch begründet werden<sup>23</sup>.

Man erhält ein einheitliches Modell zur Beschreibung der Ströme mengenartiger Größen, das in vielen Teilbereichen der Physik tragfähig ist und das die Schüler im Unterricht an vielen Beispielen kennen lernen:

- Eine elektrische Potenzialdifferenz ist ein Antrieb für einen elektrischen Ladungsstrom.
- Ein Temperaturunterschied (eine „thermische Spannung“) ist ein Antrieb für einen Entropiestrom.
- Ein chemischer Potenzialunterschied ist ein Antrieb für einen Stoffmengenstrom.
- Ein Unterschied im Gravitationspotenzial ist ein Antrieb für einen Massenstrom.
- usw.

### 7.3. Fazit

Die Vorteile des Konzepts der mengenartigen Größen aus Sicht der Fachdidaktik kann man unter den folgenden Punkten zusammenfassen:

- Verschiedene Teilgebiete der Physik werden unter einheitlichen Gesichtspunkten betrachtet. Durch die Ausnutzung von Analogien zwischen den verschiedenen Gebieten kann so die Fülle des zu unterrichtenden Stoffes reduziert werden.
- Mengenartige Größen sind besonders anschaulich. Man darf sie sich modellhaft vorstellen wie eine in dem physikalischen System enthaltene Substanz. Sie können bilanziert werden und ändern ihre Werte durch Zu- oder Abfluss und eventuell noch Erzeugung oder Vernichtung. Der Grad der Mathematisierung kann dabei leicht an das Alter der Schüler angepasst werden.
- Die hohe Anschaulichkeit und Nähe zu Alltagskonzepten ermöglicht es darüber hinaus eine weniger formalisierte Sprache als üblich im Unterricht zu verwenden. Man darf sich die mengenartigen Größen nicht nur vorstellen wie einen Stoff, man darf auch so über sie reden.
- Da physikalische Vorgänge als Austausch mengenartiger Größen beschrieben werden, ist es ganz selbstverständlich zu fragen, welchen Weg die Ströme der Größen nehmen. Das Konzept vermittelt daher von Anfang an die Anschauungen einer modernen Nahwirkungstheorie.
- Da die Vorgehensweise, physikalische Vorgänge als Austausch mengenartiger Größen zu beschreiben, der Beschreibungsweise in der Quantenmechanik formal sehr ähnlich ist, vermeidet man weitgehend den Bruch, den man normalerweise beim Übergang von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik beobachtet. Die Vorstellung von individuellen, sich bewegenden Körpern verliert an Bedeutung, aber dies kann unter diesem Gesichtspunkt

---

<sup>23</sup> Dieselbe Einteilung in Ursache und Wirkung ist in der Schule üblich im Fall der Elektrizitätslehre. Da man es meist mit spannungsstabilisierten Netzgeräten zu tun hat, wird die Spannung als Ursache des elektrischen Stroms aufgefasst. In den anderen physikalischen Teilgebieten, in denen traditionell gar nicht mit mengenartigen Größen operiert wird, gibt es natürlich auch keine vergleichbare Festlegung.

kaum als Nachteil erscheinen. Während die Kinematik, bei der die Bewegung eines Körpers im Ortsraum beschrieben wird, traditionell in der Mechanik eine große Rolle spielt, wird man bei einer Behandlung mit mengenartigen Größen mehr den dynamischen Aspekt der Bewegung, d. h. den Austausch von Impuls zwischen dem Körper und anderen Systemen, betonen.