

## B Energieumwandlungen

### B.1 Prinzipielles zu «Energie macht mobil»

Im Baukasten «Energie macht mobil» werden unterschiedliche Formen der Energieumwandlung und ihre Anwendungen thematisiert.

1. Lageenergie in Bewegung (kinetische Energie)
2. Spannungsenergie in Bewegung (Spickmobil)
3. Elektrische Energie in Bewegung und Lageenergie
4. Drehenergie in lineare Bewegungsenergie
5. Chemische Energie in thermische Energie (Kerze)
6. Thermische Energie in Bewegungsenergie (Impuls)

Die Design- und Bauaspekte in den Bauanleitungen entsprechen einem hohen verbalen Niveau, aber die Schülerinnen und Schüler können sich durch die Abbildungen selber gut helfen. Präsentierte Anleitungen durch die Lehrperson sind eher hemmend, da der Lerneffekt der Anleitungsumsetzung wegfällt.<sup>1</sup>

In meiner Unterrichtseinheit «**Energie macht mobil**» für die Sekundarschule I habe ich vollständig auf die bereitgestellten Bauanweisungen **verzichtet**, geht es doch nicht darum, Gedanken anderer nachzukochen, sondern eigene Ideen zu bilden und umzusetzen. Nur so können Kompetenzen gebildet und gestärkt werden.

Es kann aber unter Umständen durchaus von Nutzen sein, die Bauanweisungen im Rahmen einer weiterführenden Diskussion zu verwenden. Sollten sich Probleme in den Punkten 3 (*Anleitung zum perfekten Design*) und 4 (*Abschlussarbeit*) ergeben, könnten diese Diskussionen eingeschoben werden, um die MobiTeams in ihren Konstruktionen zu unterstützen.

### B.2 Physikalische Grundprinzipien

#### B.2.1 Energie ist eine Erhaltungsgrösse

Volles Verständnis der Lehrkraft von den physikalischen Grundlagen, die einem beobachteten Phänomene zugrunde liegen, ist die Grundvoraussetzung eines jeden erfolgreichen Unterrichts, nicht nur im MINT-Bereich.<sup>2</sup> Energie<sup>3</sup> kann weder gewonnen noch verloren gehen, sondern nur von einer Form in die andere umgebaut werden.<sup>4</sup> Seit Albert Einstein



<sup>1</sup> Technikkompetenz: 3.4 Gebrauch und Unterhalt von Geräten – verbale Gebrauchsanweisung verstehen und umsetzen

<sup>2</sup> Van Dijk Esther and Kattmann Ulrich: 2010: «Evolution im Unterricht: Eine Studie über fachdidaktisches Wissen von Lehrerinnen und Lehrern.» Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 16: S. 7-21. Hier wird gezeigt, dass der Unterrichtserfolg der Schülerinnen und Schüler nur von der Literacy und dem Verständnis der Natur der Sache (*Nature of Science: NoS*) der unterrichtenden Lehrperson abhängt. Alle anderen Effekte nivellieren sich und sind deshalb unwichtig für den allgemeinen Unterrichtserfolg.

<sup>3</sup> Der Energiebegriff ist für Schülerinnen und Schüler schwierig zu erfassen. Am einfachsten ist der Energieerhalt einer Situation, also in einem bestimmten System, über die Fähigkeit der Energie, Arbeit zu verrichten, zu definieren. Zum Beispiel genügt der Energieinhalt eines Joghurts (800 kJ) einen Familienwagen von zwei Tonne Masse um 40 Meter hochzuheben!

<sup>4</sup> 1. Hauptsatz der Thermodynamik: Die gesamte Energie eines abgeschlossenen Systems bleibt immer konstant.

(14 March 1879 – 18 April 1955) kennen wir auch die Beziehung zwischen Masse und Energie, was beide zusammen zu einer einzigen Erhaltungsgrösse werden lässt.<sup>5</sup>

### B.3 Die Anfänge der Energieumwandlung und der Technikanwendung

Die Hauptanwendung von Technik schlechthin war und ist es weiterhin, Umwandlungen vorzunehmen, sei es, Energieformen umzuwandeln, um sie für die menschliche Anwendung nutzbar zu machen, Informationen so zu kodieren, dass sie transportierbar und am Ziel auch wieder darstellbar werden, oder Stoffumwandlungen durchzuführen, um die Produkte dem Menschen zugänglich und nützlich zu machen.

Die biologischen Wurzeln unserer Technikmöglichkeiten können wir bei unseren nächsten Verwandten heute noch immer studieren. Schimpansen verwenden, wie es vermutlich auch schon unsere gemeinsamen Vorfahren taten, handwerkliche Techniken, um Ameisen zu fangen, Kommunikationstechniken, um ihre Reviere abzugrenzen, Audiotekniken um eindringend Gegnern zu imponieren<sup>6</sup>, kinetische Energieumwandlung von Steinen, um Nüsse zu knacken. Dass diese Fähigkeiten bei den Primaten nicht auf Menschen und Schimpansen beschränkt ist, zeigen Mitglieder einer Kapuzineraffenhorde in Südamerika. Diese haben einen einwöchigen Prozess entwickelt, während dessen sie das ölige Fleisch der Frucht einer Steinpalme für sich nutzbar machen.<sup>7</sup> Es dauert ganze acht Jahre, bis ein neues Mitglied diese Technik beherrscht. Nüsseknacken ist die einfachste Form der Energieumwandlung im Verlauf einer technischen Anwendung. Kinetische Energie dient Zerstörung und wird dadurch in der Nahrungsgewinnung verwendet. Die gleiche Technik haben menschliche Vorfahren angewendet, um Meermuscheln zu knacken. Erst durch diese Änderung der Lebensumstände gelangten sie an die Nahrungsbestandteile, die für die Entwicklung unseres Riesengehirns dringend notwendig waren.<sup>8</sup> Später verfeinerten sie die Technik, um spezifische Steinwerkzeuge herzustellen. Eine weitere bahnbrechende Grundtechnik ist die Umwandlung von biologischer Energie im Holz in chemische Energie zur Bindungsbrechung beim Garen durch das Feuer.<sup>9</sup> Hier muss nochmals erwähnt werden, dass es keine vererbte Techniken bei höheren Tieren gibt. Was wir als Technik erkennen, wird kulturell weitergegeben, muss aber auf eine genetisch optimale Innen- und Mitwelt treffen, um erfolgreich weitergegeben werden zu können.

Die bahnbrechenden, zur Industrialisierung beitragenden Technikanwendungen waren sehr eng mit der Energieumwandlung verbunden. Am offensichtlichsten ist dies, wenn die eingesetzte Energie zur Kraftgewinnung verwendet werden kann, wie dies bei der Verwendung von gefrierendem Wasser beim Strassenbau in den Alpen und bei der Verwendung von Zugtieren, Fahrrädern, Automobilen, Dampfmaschinen, Wasserkraft- und Atomkraftwerken oder offensichtlich der Fall ist.

<sup>5</sup>  $E = c^2 \otimes m$ ; Energie ist gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit im Quadrat

<sup>6</sup> Sie schlagen auf hohle Baumteile, die ihre persönliche akustische Wirkung durch Resonanz kräftig verstärken.

<sup>7</sup> Film auf YouTube: Affen - Einfach genial: Teile [1](#), [2](#), [3](#)

<sup>8</sup> Dies ist ein wesentlicher Teil der Vererbung, die so genannte kulturelle Vererbung. Der Technikgebrauch scheint eine entscheidende Rolle beim Übergang vom Homo Habilis zum Homo Erectus gespielt zu haben. Die möglichen Anlagen waren wohl schon vorhanden, hat sich die Masse der Grosshirnrinde doch in einer relativ kurzen Zeitspanne (800'000 Jahre) fast verdoppelt. So hatten diese Frühmenschen endlich die Möglichkeit ihre Gene voll zur Entfaltung zu bringen und die schon früher mögliche Vergrösserung ihre Gehirne zu erleben und der Selektion auszusetzen. Dies bot ihnen einen gewaltigen Überlebensvorteil, die sie schliesslich zur alles bestimmenden Menschenart werden lies, mit noch leistungsstärkeren Gehirnen.

<sup>9</sup> Hat den Menschen unabhängig vom Meer werden lassen und die Möglichkeit gegeben, seine Nahrung optimal zu verwerten. Dadurch wurde die Möglichkeit von noch grösseren Gehirnen geschaffen, was die Entwicklung von ausgeklügelten Jagdtechniken und der dafür notwendigen komplexen Sprache begünstigte.

## B.4 Energie(um)formen und die Wirkung

Energie kann in Kräfte<sup>10</sup> umgewandelt werden und so auf einen Körper einwirken. Sie kann aber weder erschaffen noch gewonnen werden. Im ganzen beobachtbaren Universum gilt das Energiemasse-Erhaltungsgesetz von Einstein  $E = m \otimes c^2$ .

### B.4.1 Lageenergie

Die Wirkung einer Energieumwandlung kann meist nicht direkt beobachtet oder gebraucht werden. Meist wird ein Energiegefälle, sogenannte Differenzen im energetischen Potenzial, dazu gebraucht, Kräfte auf Körper wirken zu lassen.

In der Explore-it-Anwendung «Flitzer» geschieht dies durch die Differenz der Lageenergien, die über die Wirkung der Gravitationskraft ( $F_G$ ) entlang eines bestimmten Wegs ( $s$ ) den Flitzer antreibt. Die Gewichtskraft ist proportional zur Masse des Flitzers und zur Erdbeschleunigung ( $g$ ).

$$F_G = g \otimes m$$

#### B.4.2.1 Sonderform – die schiefe Ebene

Da es sich im Versuch «Flitzer» **nicht** um einen freien Fall handelt, sondern um eine schiefe Ebene mit dem Steigungswinkel  $\alpha$ , berechnet sich die beschleunigende Kraft durch:

$$F_a = F_G \otimes \cos \alpha = m \otimes g \otimes \cos \alpha$$

Diese beschleunigende Kraft wirkt auf die Masse  $m$  und beschleunigt diese nach den gleichen Gesetzen. Die Beschleunigung ( $a$ ), die der Flitzer erfährt, berechnet sich demnach

$$a = F_a \div m = m \otimes g \otimes \cos \alpha \div m = g \otimes \cos \alpha$$

und ist immer unabhängig von der Masse des Flitzers!

Folglich ist auch die Geschwindigkeit im Blickwinkel der Energieerhaltung unabhängig von der Masse. Die Geschwindigkeit, ohne bremsende Kräfte, ist somit nur abhängig von der Zeit oder dem Weg, entlang deren eine beschleunigende Kraft beschleunigend wirken kann.

### B.4.2 Spannungsenergie

Wird ein elastischer Körper gespannt, speichert er die zur Spannung aufgewendete Energie innerhalb seiner molekularen Strukturen, indem er molekulare Interaktionen verändert. Dadurch werden die Abstände zwischen den Bausteinen entweder vergrößert oder verkleinert ohne ihre Bindungen aber dauerhaft zu verändern. Durch die angelegte Kraft werden die Bausteine in einer Feder in dieser für sie ungünstigen Position gehalten. Dies nennt man energetische Elastizität.

---

<sup>10</sup> Der Kraftbegriff sollte über Federwaagen im Physikunterricht bereits abgelehrt sein, ansonsten muss er eingeführt werden.

### B.4.2.1 Energetische Elastizität in Federn

Elastische Legierungen von Metallen besitzen eine sehr hohe Festigkeit. Diese wird meist durch die Einbettung von Kohlenstoff- und/oder Siliziumatomen in die Stahllegierung erreicht. Dadurch bestehen diese Metalle aus positiv geladenen Rumpfatomen, die durch den Elektronensee ihrer freien Elektronen zusammengehalten werden, und den störenden, ungeladenen kleinen Kohlenstoff- und Siliziumatomen. Durch ihre spezielle Anordnung fixieren sie die metallischen Rumpfatome an ihren Orten und verhindern die durch einwirkende Kräfte mögliche Umlagerung der Rumpfatome, die zur plastischen Deformation führen würde. Dadurch werden diese Metalllegierungen sehr hart und parallel dazu elastisch, falls sie in die richtige Federform gebracht werden. Durch die mechanische Ausweitung und Verdichtung in einer Feder werden die positiv geladenen Rumpfatome zusammengedrückt und der neutralisierende Elektronensee herausgedrückt. Durch die neutralen Störatome können sich die Rumpfatome aber nicht verschieben, weshalb sie sich permanent abstossen. Diese Abstossung führt zur Federentspannung, die sich löst, sobald die rückhaltende Kraft wegfällt. Somit können wir auch den beobachteten linearen Zusammenhang zwischen angelegter Kraft und erzeugter Federverlängerung begründen.

Bei einem Gummiband werden die sehr langen Ketten in eine ihnen nicht entsprechende Ordnung gezwungen, was wir als entropische Elastizität bezeichnen.

### B.4.2.2 Entropische Elastizität von Gummi

Gummi ist aus verschiedenen langen Gummipolymeren zusammengesetzt, die sich in einem Gummiband zufällig ausrichten, um die tiefste entropische Energieform zu wahren. Sobald eine Kraft auf das Gummiband wirkt, werden die Polymere gestreckt, und das Band wird dünner und länger. Die Interaktionen zwischen den Polymeren bleibt innerhalb der Elastizitätsgrenze konstant stark und zwingt die Polymere selbst, sich zu strecken und neu zu ordnen. Sobald die Kraft wegfällt, begeben sich die Polymere wieder in ihre zufällige Form zurück, da die einzelnen Bindungen frei rotieren können, und das Gummiband zieht sich zusammen.<sup>11</sup> Der elastische Körper erreicht unter Abgabe der gespeicherten Energie seine Ursprungsform zurück und die Polymere ihre ungeordnete Gleichgewichtsposition. Erst eine Überdehnung verändert deren Anordnung irreversibel.

Die Energie, die wir als Zugkraft in das Gummiband oder die Feder gespeichert haben, wird zum grössten Teile wieder in eine Kraft umgewandelt, die zum Beispiel das Spickmobil antreibt.

### B.4.2.3 Das Spickmobil - Messung von Grössen

➔ **Energieausbeute messen:** Ein Gummiband mit einem befestigten Gewicht wird vertikal gespannt und dessen Auslenkung festgehalten. Diese Auslenkung wird in Bezug zur Auslenkung der ersten Rückschwingung gesetzt. Dieses Verhältnis muss der Energieausbeute entsprechen. Die Energie wird durch den Term «Kraft mal Weg» definiert ( $E = F \otimes s$ ), die Kraft bleibt konstant, weshalb das Verhältnis der gemessenen Strecken ( $s_1 \div s_2$ ) der Energieausbeute eines Elastizitätszyklus entspricht.

➔ **Beschleunigung:** Im Gegensatz zur Situation mit der Lageenergie ist die Beschleunigung beim Spickmobil abhängig von der Masse. Sie ist umgekehrt proportional zur beschleunigten Masse ( $a = F \div m$ ). Das heisst, je grösser die Masse, desto kleiner wird die Beschleunigung ausfallen.

<sup>11</sup> Die Moleküle sind untereinander in einem Winkel  $\neq 180^\circ$  verbunden, was zu einer Verkürzung der Polymere führen muss, sobald sie nicht mehr gestreckt werden.

➔ **Messungen:** Dieser Zusammenhang sollte beim Spickmobil als Effekt messbar sein, kann aber nicht durch die zurückgelegte Wegstrecke bestimmt werden, da die Wirkung von bremsenden Kräften ebenso von der Masse abhängt.

### B.4.3 Elektrische Energie

Im Gegensatz zur Lage- und Spannungsenergie ist die elektrische Energie eine nicht direkt einsetzbare Energiequelle. Um elektrische Potenziale ausnützen zu können, muss eine Umwandlung in mechanische, thermische oder chemische Energieformen stattfinden. Diese geschieht immer in technischen Umwandlungslösungen.

Am Beispiel der Explore-it-Anwendung «Elektromobil» geschieht dies mittels einer Monozelle (1,5 V) «Batterie»<sup>12</sup>, eines Schalters, eines Elektromotors und einer Riemenübertragung.

Der Elektromotor besteht aus einem fixen Permanentmagneten (Bausatz vom Magneten zum Elektromotor), einer rotierenden Achse, die mit einer Kupferwicklung versehen ist, und den Stromleitungen. Im Gegensatz zur Monozelle kann der Elektromotor (eine Gleichstrommaschine) des Baukastens ohne Probleme geöffnet und untersucht werden. Dadurch können Bestandteile und somit die Funktionsweise direkt einsehbar gemacht werden.<sup>13</sup> Durch die Verwendung einer Batterie von zwei seriellen Monozellen kann die Geschwindigkeit des Mobils verdoppelt werden. Ein Motor erzeugt ein Drehmoment, das auf die Achsen des Fahrzeugs und die damit verbundenen Räder übertragen wird. Die Räder übertragen dann das Drehmoment über ihre Reibkräfte direkt auf den Boden, was zur Bewegung des Elektromobils führt. Sind die Achsen parallel ausgerichtet, handelt es sich um eine geradlinige Bewegung.

Die physikalischen Grundlagen und Berechnungen sind bei einem Elektromotor nur betreffend Wirkungsgrad von Interesse. Spannung, Stromstärke, Bauweise, Wickeldrahtdurchmesser, Wicklungszahl, Wicklungsdurchmesser und die Feldstärke des Permanentmagneten sind einige Parameter, die die Charakteristika eines Elektromotors in komplexen Wechselwirkungen bestimmen und auch thematisiert werden könnten (eher im Bausatz «Vom Permanentmagneten zum Elektromotor»)

<sup>12</sup> Eine Monozelle wird eine elektrische Quelle genannt, die nur aus einer elektrochemischen Einheit (galvanische Zelle) aufgebaut ist und eine definierte Gleichstrom-Spannung (1,3 V für NiMe, oder 1,5 V für Lithium) erzeugt. Mit der Grösse der Monozelle können die abgegebene Energie und die erbrachte Leistung erhöht werden, aber nicht deren Spannung. Diese beruht auf der elektrochemischen Beschaffenheit der Monozelle und ist nur abhängig von den elektrochemischen Potenzialdifferenzen der chemischen Reaktionen. In einer Batterie (Autobatterie) werden mehreren Monozellen hintereinander (in Serie) geschaltet, um eine grössere Spannung (3 x 1,5 V) zu erhalten, oder nebeneinander (parallel) platziert, um die nutzbare Strommenge/Zeiteinheit zu erhöhen. Beide Anordnungen erhöhen die Leistung einer Batterie im Gegensatz zur Monozelle. Welche Spannung und wie gross der Stromfluss gewählt werden muss, entscheidet die Bauart des Elektromotors und dessen Widerstandsprofil. Die Bauart der Monozelle kann heute variieren, meist wird sie aber nach dem Prinzip einer Braunsteinzelle konstruiert (<http://www.techniklexikon.net/d/braunsteinzelle/braunsteinzelle.htm>).

<sup>13</sup> Zum Ausbau wird ein 1,8-Millimeter-Mikroschraubendreher benötigt, um die beiden Haltetaschen der Abschirmung aufzubiegen und die Plastikabdeckung mit den Stromübertragungslitzen, die über ein leitendes Fett mit dem zweiteiligen Kommutator verbunden sind, zu entfernen. Der zweiteilige Kommutator leitet den Gleichstrom in die drei Ankerwicklungen, die für die Drehbewegung verantwortlich sind. Fliesst Gleichstrom durch eine Ankerwicklung wird ein magnetisches Feld erzeugt, das je nach Stromrichtung eine unterschiedliche Richtung besitzt. Die Wicklungen sind in einem kreisförmigen Permanentmagneten mit einem stabilen Magnetfeld eingebettet, die unterschiedliche Pole gegen die Wicklung hin ausgerichtet hat. Da der zweiteilige Kommutator die Magnetfeldrichtung der Ankerspule gleichsetzt, wie das Feld des nahen Permanentmagneten, wird die Spule von diesem abgestossen. Dieser Abstossung kann die Spule nur durch Rotation gerecht werden. Sobald sie in die Nähe des entgegengesetzten Magneten kommt, polen sich die Stromrichtung und das erzeugte Magnetfeld um und der Vorgang wiederholt sich. Die ganze Achse zusammen mit den drei Ankerspulen (wozu drei? Hinweis: toter Punkt) kann durch Entfernen der Riemenübertragungsmuffe aus Plastik ausgebaut und untersucht werden. Anschliessend lässt sich der Motor wieder zusammenbauen. Ich empfehle, dass jede Gruppe dies einmal durchführt, denn Funktion wird nur über Struktur einsehbar.

Wie beim Spickmobil spielt die Masse eine entscheidende Rolle für die zu erreichende Geschwindigkeit. Aber interessanter als der Einfluss der Masse auf die Geschwindigkeit, ist deren Einfluss auf die technische Drehmomentübertragung.

1. Ab welcher Masse oder Steigung kommt sie zum Erliegen und das Fahrzeug zum Stillstand?
2. Welche Probleme liegen dieser Beobachtung zugrunde?
3. Welche technischen Lösungen dieses Problems können gefunden werden?
4. Was hat dies mit einer Fahrradschaltung zu tun?

#### B.4.4 Energieübertragung durch Impulserhaltung (Rakete)

Impulserhaltung und Volumenänderung durch Verdampfung und Kondensation sind die wirkenden Prinzipien beim Rückstoßantrieb des Tuck-Tuck Boots. Hier sind die für die Entstehung der Bewegung verantwortlichen Prinzipien und Kräfte am schwierigsten zu beschreiben und auf das Niveau der Schülerinnen und Schüler auf Sekundarstufe I zu brechen, aber doch nicht so komplex, dass sie, wie in der Anleitung beschrieben, zu einer vollkommen absurden Beschreibung des Mechanismus führen dürfte.<sup>14</sup>

Fragen, die zum Mechanismus und zu den grundlegenden Prinzipien führen können.

- ➔ **Warum Tuck –Tuck und nicht eine kontinuierliche Bewegung?** Die Tuck - Tuck-Bewegung deutet auf einen zweiphasigen Prozess hin, Tuck - Pause - Tuck - Pause.
- ➔ **Das Tuck.** Während dieser Phase wird das Wasser, das sich im Verdampfer befindet, verdampft. Dadurch dehnt es sich stark aus und drückt Wasser mit der Verdampfungs geschwindigkeit aus den beiden Röhren hinaus<sup>15</sup>. Das Tuck entsteht vermutlich, weil etwas Gas aus den Röhren austritt.
- ➔ **Die Pause.** Sobald der Wasserdampf die heisse Röhre im Verdampfer verlassen hat und in die durch das Umgebungswasser gekühlte Röhre unterhalb des Wasserspiegels gelangt, kondensiert das Wasser und verringert so sein Volumen auf den vorherigen Wert. Dies lässt Wasser wieder hereinströmen.
- ➔ **Impulsdifferenz.** Die Masse des aufgesogenen und ausgestossenen Wassers muss identisch sein, sonst würde sich das System vollkommen entleeren oder vollsaugen. Da der Verdampfungsprozess schneller verläuft, als der Kondensationsprozess ist die Geschwindigkeit der ausgestossenen Wassermasse grösser, als diejenige des aufgenommenen Wassers. Da der Impuls in einem geschlossenen System<sup>16</sup> konstant bleiben muss, kann sich die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen aufgenommenem und abgegebenem Wasser nur durch eine beschleunigende Kraft auf das Boot ausgleichen. Deshalb wirken in diesem Fall die sich opponierenden Impulse beschleunigend auf das Boot, und dieses tuckert vorwärts.<sup>17</sup>

<sup>14</sup> In der Explor-it-Anleitung wird etwas gesagt über die Ansaugrichtung und die Ausstossrichtung des Wassers, die für das Bezugssystem Boot aber egal sind. Dieses kümmert sich nur um die Richtung, in der das Wasser das System betritt und wieder verlässt.

<sup>15</sup> Ein Test mittels unterschiedlicher Lebensmittelfarbe in beiden Röhren kann diese erste Phase zeigen.

<sup>16</sup> In unserem Fall setzt sich der Gesamtimpuls des Systems aus der Summe des Impulses des Boots ( $v_{\text{Boot}} \times m_{\text{Boot}}$ ), des aufgenommenen Wassers ( $v_{\text{auf}} \times m_{\text{Wasser}}$ ) und des abgegebenen Wassers ( $-v_{\text{ab}} \times m_{\text{Wasser}}$ ) zusammen.

<sup>17</sup> Hier könnte auch die Entfernung des Mondes von der Erde als ein (dreh-) impulserhaltendes System Erwähnung finden. Durch das Abbremsen der Erdrotation muss sich der Mond entfernen, um den Drehimpuls des ganzen Systems konstant zu halten: Bye-bye Mond

➔ **Mögliche Parameter, die durch ihre Veränderung einen sichtbaren und messbaren Effekt zeigen sollten.** Wir haben gesehen, dass sich das Boot nach vorne bewegt, falls die Erhitzung schneller vonstatten geht, als der Kondensationsprozess. Dieses Phänomen lässt sich in Versuchen weiter hinterfragen:

1. Kühlt man das Umgebungswasser ab (Eiswürfel), so sollte sich der Prozess der Kondensation beschleunigen und sich deshalb die Geschwindigkeit des Boots verringern.
2. Im Extremfall könnte sich die Bewegungsrichtung des Boots sogar umkehren lassen. Eventuell braucht es aber eine Kombination mit Punkt 5.e um diesen extremen Fall zu erreichen.
3. Bei warmem Umgebungswasser sollte sich die Geschwindigkeit des Boots vergrössern, bis sie ganz abreisst, weil der Wasserdampf nicht mehr kondensieren kann und vollständig austritt.
4. Dies könnte durch ein verlängertes Rohr korrigiert werden.
5. Die Nähe zur Flamme ist proportional zur Verdampfungsgeschwindigkeit, weshalb ein grösserer Abstand zu einem langsameren Boot führen sollte und umgekehrt (Achtung Abriss verhindern).

## B.5 Reibungskräfte

### B.5.1 Kräfte können auf Körper negativ beschleunigend wirken

Eine Anekdote: Meine Tochter fragte mich vorwurfsvoll, weshalb denn das von mir empfohlene teure Fahrrad schlechter sei, als das billige ihres Freundes. Ich fragte sie, weshalb sie das glaube. Sie antwortete mir, dass sie bei gleichzeitiger Talfahrt immer den Kürzeren ziehen würde, obschon sie vom Physikunterricht her wisse, dass die Beschleunigung eines Körpers unabhängig von dessen Masse ist (siehe oben). Ihr Freund ist um einiges massereicher, als sie. Sie hatte das Schwerpunktfach «Physik und Anwendungen der Mathematik» besucht, aber trotzdem konnte sie ihr Wissen über die Wirkung von bremsenden Kräften nicht auf die Einordnung ihres Erlebnisses übertragen. Ihre korrekte Beobachtung hat sie dahingehend interpretiert, dass ihr teures Fahrrad schlechter rollt, als das billige. Beobachtungen und Diskussionen, die ich anlässlich einer Explore-it-Lehrerfortbildung gemacht habe und diese familiäre Erfahrung zeigten mir, dass einige Missverständnisse betreffend Energieerhaltung und -übertragung vorherrschen, die schliesslich zur Verankerung von solch naiven, meist nicht zutreffenden Vorstellungen führen können.

Weshalb läuft ein beschwerter Flitzer oder ein massereicher Fahrradfahrer schneller den Berg hinunter und gleitet weiter als sein leichteres Pendant? Die Erklärung des Prozesses nur mit Hilfe der Energieerhaltung in der beschleunigten Bewegung kann demnach nicht vollständig sein.<sup>18</sup> Welche anderen Kräfte übertragen zusätzlich Energien? Es sind alle Reibungskräfte, deren bremsende Wirkungen wir in unserer bisherigen Betrachtung ausser Acht gelassen haben.

Die Reibungskräfte wirken bei rollenden Fahrzeugen fast unabhängig von deren Masse und sind somit für leichte Fahrzeuge wirkungsvoller. Fahrradbremzen sind viel schwächer als Auto- oder gar Lastwagenbremsen. Dieser Zusammenhang ist nicht leicht auf die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler übertragbar.

---

<sup>18</sup> Hier könnte mit einem kognitiven Konflikt gearbeitet werden: Gesetze versus Beobachtung.

Mein Vorschlag zur Thematisierung diese Phänomens:

**Versuch eins:** Zur Einführung nimmt man zwei identische Schaumstoffstücke aus dem Explore-it-Kasten und lässt sie gleichzeitig fallen, nur mit einer unterschiedlichen Ausrichtung entlang einer der beiden Hauptachsen. Obschon beide gleiche Masse besitzen müssen, kommt das eine schneller am Boden an als das andere (welches und warum?). Wie viel Gewicht muss ich beim langsameren dazugeben, damit beide gleich schnell fallen. Dies wäre eine mögliche Verknüpfung zum Fahrradproblem.

**Versuch zwei:** Auf einem Plattformwagen werden zwei unterschiedlich schwere, aber sonst identischen Fahrzeuge platziert. Der Plattformwagen wird so gegen ein Hindernis gefahren, dass beide Fahrzeuge den Impuls weiter nehmen und entlang einer glatten Oberfläche fahren können. Dabei kann einfach gezeigt werden, dass das schwerere Fahrzeug weiter rollt, als das leichtere, obschon beide zu Beginn gleich schnell gewesen waren. Es können auch Messungen durchgeführt werden, die den genauen Zusammenhang zwischen Masse und der erreichten Distanz zeigen.

#### Weiterführende Fragen:

1. Wodurch werden die Fahrzeuge zum Anhalten gebracht?
2. Wie lassen sich diese Wirkungen erhöhen oder minimieren?
3. Können gebaute Fahrzeuge so eingestellt werden, dass sie exakt eine bestimmte Strecke zurücklegen?
4. Wie verhält sich die Anhaltestrecke zur Fahrgeschwindigkeit bei zwei Fahrzeugen mit 30 km/h und 50 km/h?

### B.5.2 Festkörperwiderstand

Jede Bewegung entlang einer ruhenden Oberfläche wird über Reibungsprozesse gebremst. Reibung hängt immer von den sich reibenden Kontaktflächen und ihrer Beschaffenheit ab. Je mehr Widerstand sie sich gegenseitig bieten, desto grösser sind die Reibungskräfte. Noch heute findet man im deutschsprachigen Raum, wenn überhaupt, nur oberflächliche Erklärungen, worauf Reibungsprozesse basieren. Durch die Oberflächenkontakte verbinden sich Moleküle der beiden Oberflächen miteinander, meist über Van-der-Waals oder elektrostatische Kräfte.<sup>19</sup> Diese Kräfte sind in unbewegten Gegenständen meist, aber lange nicht immer, grösser als in sich bewegenden Gegenständen.<sup>20</sup> Der Grund ist einfach: Damit sich Van-der-Waals Kräfte ausbilden könnten wird Zeit benötigt. Die Kontaktzeit während einer Bewegung ist aber viel geringer, als wenn ein Gegenstand steht. Dieser Effekt verringert die Reibkräfte von sich gegenseitig bewegenden Oberflächen. Ganz anders verhält es sich bei elektrostatisch induzierter Reibung. Diese entsteht erst durch Bewegung (Ladungstrennung) und klingt mit der Bewegungslosigkeit durch einen Ladungstransfer wieder ab (Ballonexperiment).

Durch die Kontakte wirken atomare Kräfte auf den meist riesigen Gegenkörper (Erde). Diese besitzt eine gewaltiges Trägheitsmoment, die eine Umwandlung der Kraft in Bewegung verhindert. Durch die Bindungen werden Molekülverbindungen auf beiden Oberflächen gedehnt. Sobald die

<sup>19</sup> «Misconception» Reibung: <http://amasci.com/miscon/miscon4.html#fric>

<sup>20</sup> Englische Wikipedia-Seite: <http://en.wikipedia.org/wiki/Friction>



Verbindungen sich wieder lösen, schnellen die Oberflächenmoleküle zurück.<sup>21</sup> Dieser Prozess wiederholt sich, wodurch die Moleküle in Schwingung geraten und sich dadurch erwärmen. Somit beobachten wir die bremsende Kraft auf unser Fahrzeug und einen Temperaturanstieg in unserem System.

### B.5.3 Widerstand in Flüssigkeiten und Gasen

Die Reibkräfte durch Luft- oder Flüssigkeitswiderstände dagegen basieren nicht nur auf direkten Interaktionen mit den leicht beweglichen Teilchen. Sie sind auch eine Folge der Wirbelbildung in der Flüssigkeit oder in einem Gas.<sup>22</sup> Da die beweglichen Teilchen sehr gut mit der sich bewegenden Oberfläche interagieren können, übertragen sich die Bewegungskräfte direkt auf die Flüssigkeitspartikel. Dadurch wirkt, neben der Wechselwirkung mit Wirbeln, nur noch die Viskosität des Mediums bremsend auf den sich bewegenden Gegenstand.

In einem Gas dagegen sieht die Sache etwas anders aus. Gase lassen sich vor dem sich bewegenden Körper komprimieren, und dahinter dehnt es sich aus. Dies führt zu vermehrtem Widerstand vorne und zu einem Zurückzerren hinten. Zudem beobachten wir an allen Kanten eine starke Wirbelbildung, die viel von der Bewegungsenergie in Wirbelrotationsenergie umwandelt.

Zum Abschluss möchte ich noch Albert Einstein zu Worte kommen lassen:

*Ich fürchte mich vor dem Tag, an dem die Technologie unsere Menschlichkeit übertrifft. Auf der Welt wird es nur noch eine Generation aus Idioten geben.*

Diese Gefahr sollte uns nicht gegen die Technologie aufwiegeln, sondern uns bewusst machen, dass wir unsere Kinder auf eine technologisch bestimmte Welt vorzubereiten haben.

---

<sup>21</sup> Ein anderer Fall trifft ein, wenn die Reibkräfte grösser sind als der Oberflächenzusammenhalt. Dann stellen wir einen Abrieb fest (Schmiergelpapier), und die Bewegungsenergie geht über in nicht thermische Entropie.

<sup>22</sup> Diese Wirbel spielen eine grosse Rolle beim Fliegen und vermitteln einen grossen Teil der Auftriebskraft.