

Die Energie als Erhaltungsgröße – ein Unterrichtskonzept

Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise zur Einführung des Energiebegriffs ist die Tatsache, dass sich *Energie als physikalische Größe* nur als abstraktes Konzept definieren lässt, jedoch die *Erhaltung der Energie* in einfachen Systemen unserer Alltagserfahrung durchaus entspricht. Dass ein Pendel bei geringer Reibung seine Amplitude nur langsam abbaut, bzw. im idealisierten Grenzfall beibehält, erregt keinerlei Aufsehen, während selbstverständlich niemand ein spontanes Anwachsen der Amplitude erwartet. Auf derartigen Erfahrungen basiert ein intuitives Erfassen der Energie als Erhaltungsgröße. Es liegt nahe, auf dieser der Alltagserfahrung entnommenen, prinzipiell aber korrekten Vorstellung aufzubauen und nicht den schwierigeren aber oft üblichen Weg über die mechanische Arbeit zu beschreiten.

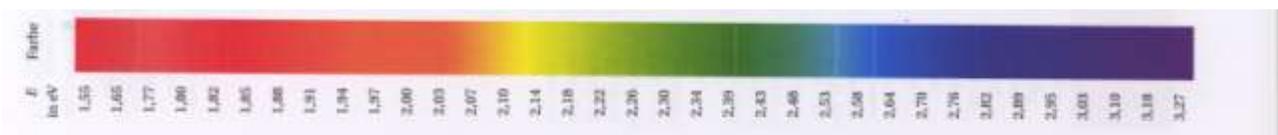
Mit dem didaktischen Prinzip „Energie vor Arbeit“ erfährt das die gesamte Naturwissenschaft durchdringende Prinzip der Energieerhaltung eine entsprechende Betonung. Schließlich lässt sich zu einem späteren Zeitpunkt die Wärme als Form übertragener Energie leicht in das bestehende System integrieren. In der Konsequenz des Unterrichtskonzepts treten dann auch im Unterricht über elektrische Energie die Aspekte der Schalttechnik etwas in den Hintergrund. Als Vorteil wird gesehen, dass die quantenmechanischen Aspekte der Atom- und Kernphysik sowie der Strahlungsphysik sich ohne Bruch in den Kursverlauf bis zum Ende der 10. Klassenstufe einbinden lassen.

Einbettung des Energiegedankens in den Physik-Lehrplan bis zur 10. Klassenstufe

Die zeitunabhängige Betrachtung von Systemen mit Hilfe der Energie als Erhaltungsgröße ist ein Prinzip, das sich als übergreifender Gedanke in allen Naturwissenschaften etabliert hat und das deshalb auch in den Fächern Biologie, Chemie und Physik aus didaktischen Gründen gleichermaßen angewandt werden sollte.

Die Energieerhaltung ist das Leitthema der 8. Jahrgangsstufe, wobei das Kapitel *Einführung der mechanischen Energieformen* den vom technischen Alltag her gut zugänglichen Einstieg markiert. Im weiteren Verlauf der 8. Klassenstufe werden die innere Energie und die Wärmeenergie Unterrichtsgegenstand, so dass sich die erweiterte Form des Energieerhaltungssatzes ergibt. Konsequenz ist dann auch das Kapitel über elektrische Energie mehr in Richtung Energie/Leistung/Technologie formuliert.

In den darauf folgenden Jahrgangsstufen werden immer wieder Betrachtungen zur Energie angestellt. Dies zeigt sich didaktisch in der Darstellung des Farbspektrums über der Energiegröße 1eV (Elektronenvolt) statt der klassischen Wellenlängenskala und der Zuordnung von Emissions- und Absorptionslinie zur Energiestufenleiter der gebundenen Elektronenzustände von Atomen und Molekülen. Dazu gehört thematisch der Fotoeffekt, der prinzipiell die direkte Messung der Photonenergie gemessen in Elektronenvolt erlaubt.



Deshalb muss durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Basiskonzept Energie in der 8. Jahrgangsstufe ein wichtiges Fundament für die weiteren Jahrgangsstufen gelegt werden.

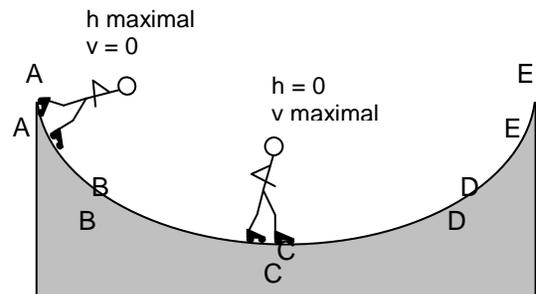
| |
|---|
| Ph 8.1 Die Energie als Erhaltungsgröße: Mechanische Energie |
| <ul style="list-style-type: none"> • Überblick über verschiedene Energiearten • Energieformen in der Mechanik |
| Ph 8.2 Aufbau der Materie und Wärmelehre: Innere Energie und Wärme |
| <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau der Materie • innere Energie |
| Ph 8.3 Elektrische Energie: Elektrische Energie |
| <ul style="list-style-type: none"> • elektrische Energie und Leistung • Einblick in die Energieversorgung |
| Ph 9.2 Atome |
| <ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme und Abgabe von Energie • Kernumwandlungen (grundlegende Betrachtungen zur Energiebilanz) |
| Ph 10.2 Die Mechanik Newtons |
| <ul style="list-style-type: none"> • Impuls als Erhaltungsgröße <ul style="list-style-type: none"> ▪ Impulserhaltungssatz ▪ Anwendung von Impuls- und Energieerhaltungssatz auf einfache Fälle |
| Ph 10.3 Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik |
| <ul style="list-style-type: none"> • Wellencharakter und Teilchencharakter des Lichts <ul style="list-style-type: none"> ▪ qualitative Experimente zur Interferenz von Licht am Doppelspalt ▪ qualitativer Nachweis des Photoeffekts und dessen Deutung durch Photonen ▪ <u>Zusammenhang zwischen Lichtwellenlänge und Photonenergie</u> |

Vorkenntnisse zur 8. Klassenstufe:

In Natur und Technik (NT 5.1.2) haben die Schüler auf propädeutischem Niveau Energieumwandlungen bei Vorgängen in der Natur kennen gelernt. Ausgehend von diesem deskriptiven Niveau wird in der 8. Jahrgangsstufe einerseits eine Schärfung und Differenzierung in den Begriffen, andererseits die Einbeziehung quantitativer Berechnungen und Messungen sowie die theoretische Erfassung über Energiebilanzen angestrebt.

Vorgehen im Unterricht – Von der Vorerfahrung zur Messgröße

In direkter Anknüpfung an die Energieumwandlungen in NT 5.1.2 wird man zunächst den Energiebegriff in der Alltagssprache aufgreifen und Beispiele für unterschiedliche Energiearten (chemische, elektrische, thermische) benennen. Hierbei kann der Begriff des Energiewandels bereits fallen und durch Energieflussdiagramm veranschaulicht werden. Im weiteren Verlauf bietet es sich an, auf qualitativem Niveau mechanische Beispiele zur Energieerhaltung insbesondere an Beispielen sich periodisch wiederholender Vorgänge zu betrachten. Denkbar wäre etwa direkt aus der Erfahrungswelt der Schüler die Bewegung eines Inlineskaters in einer Halbpipeline:



In den Punkten A und E hat der Inlineskater die maximale Höhe erreicht, die Geschwindigkeit ist dort Null. Im Punkt C hingegen hat er bei einer natürlichen Wahl des Bezugsniveaus die Höhe Null, aber die größte Geschwindigkeit. Die Bewegung wiederholt sich (im Idealfall verschwindender Reibung) stets in gleicher Weise. Da Höhe und Geschwindigkeit keine vergleichbaren Größen sind, gibt es offensichtlich eine weitere Größe, die in dem System steckt, die sich im Lauf der Zeit nicht ändert und die sich einmal in großer Geschwindigkeit und ein anderes Mal in großer Höhe manifestiert - die Energie.

Die Begriffe Höhenenergie und Bewegungsenergie drängen sich auf. Im Idealfall erreicht der Inlineskater bei E wieder die gleiche Höhe wie bei A, weshalb die Höhenenergie bei A und E gleich ist. Dies legt nahe, dass auch bei B, C und D die Summe der mechanischen Energieformen gleich ist, allerdings mit unterschiedlicher Zusammensetzung. Es bleibt zu erarbeiten, dass die Erhaltung der mechanischen Energie nur in reibungsfreien Systemen ohne äußere Einwirkung gilt.

Ein weiteres, lebensnahes Beispiel, bei dem Energieumwandlungen gut zu beobachten sind, ist ein Trampolinspringer, bei dem die dritte mechanische Energieform, die Spannenergie, in Erscheinung tritt. Zusammenfassend wäre folgende Konkretisierung zu den Energiearten denkbar:

Energie kann in verschiedenen Formen auftreten:

- Ein Körper, der sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt, besitzt Bewegungsenergie. Diese ist umso größer, je schneller und massereicher der Körper ist.
- In einer Feder, die gedehnt bzw. gestaucht wird, steckt Spannenergie. Diese ist umso größer, je härter die Feder ist und je stärker sie gedehnt bzw. gestaucht ist.
- Ein Körper, der sich in einer bestimmten Höhe über einem Bezugsniveau befindet, hat Höhenenergie. Diese ist umso größer, je massereicher der Körper ist und je höher er sich befindet.

Durch die folgende Formulierung können die Schüler vom abstrakten Begriff des abgeschlossenen Systems entlastet werden:

In einem reibungsfreien mechanischen System ist die Gesamtenergie zu jeder Zeit gleich, wenn es von außen nicht beeinflusst wird. Dabei kann die Gesamtenergie auf unterschiedliche mechanische Energieformen verteilt sein. Dieses Prinzip nennt man Energieerhaltung.

Bei der Einführung der Energie als Erhaltungsgröße sollte auch der Unterschied zwischen dem fachlichen Energiebegriff und dem Energiebegriff in der Umgangssprache (z.B. Energiequelle, Energieverlust o. Ä.) deutlich hervorgehoben werden.

In einer anschließenden Übungsphase beschreiben die Schülerinnen und Schüler qualitativ, welche Energieformen in einer bestimmten Phase einer Bewegung auftreten und wann sie Maximalwerte erreichen. Hierzu eignen sich besonders periodische Bewegungen, die in den Aufgaben zur Link-Ebene zur Verfügung gestellt werden:

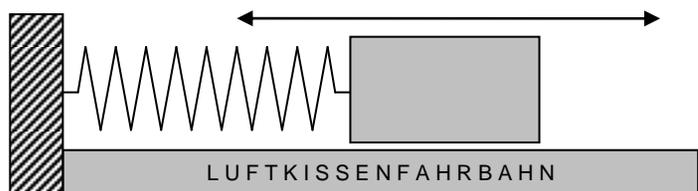
„Inlineskater“

„Trampolin“

„Energiediagramm – Trampolin“

Ein schönes Beispiel, bei dem Spannenergie direkt in Bewegungsenergie umgewandelt wird, ist bei folgendem Laborversuch zu beobachten:

Ein einseitig an einer Feder befestigter Versuchswagen pendelt auf einer Luftkissenfahrbahn annähernd reibungsfrei hin und her, wobei Spannenergie in Bewegungsenergie umgewandelt wird und umgekehrt.



Goldene Regel der Mechanik.

Der Übergang von der qualitativen Energiebetrachtung hin zur quantitativen geschieht über die Goldene Regel der Mechanik, wobei an einem Körper (genauer am System Körper – Erde) mit Hilfe eines Kraftwandlers Hubarbeit verrichtet wird.

Zwar ist die Wahl des Kraftwandler von untergeordneter Bedeutung, doch lässt sich die Goldene Regel besonders einfach am Flaschenzug oder der schiefen Ebene zeigen. In den bekannten Experimenten erhält man im verlustfreien Idealfall $F \cdot s = \text{konstant} = mg \cdot h$ (★), wobei F im Fall der schiefen Ebene die Hangabtriebskraft ist und im Fall des Flaschenzugs die Zugkraft. Entsprechend ist s der zurückgelegte Weg bzw. die Seilzuglänge.

Die Auswertung des Versuchs liefert eine Vielzahl von neuen Aspekten und Begriffen. Zunächst beschreibt die Gleichung (★) selbst die Goldene Regel der Mechanik:

(Ideale) Kraftwandler ändern das Produkt aus Weg und Kraft entlang des Weges nicht.

Im Unterricht folgen Beispiele zur Anwendung und zur Einübung der Goldenen Regel. Im Anschluss macht folgende Überlegung die Definition der Arbeit plausibel:

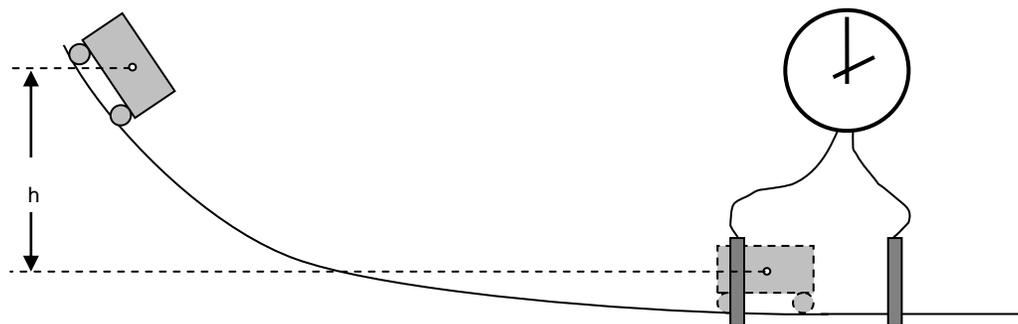
Werden statt einem zwei gleiche Körper (oder ein doppelt so massereicher) über die gleiche Wegstrecke s transportiert, hat sich die aufzuwendende Arbeit verdoppelt. Wird der ursprüngliche Körper zweimal über die Strecke s transportiert (oder doppelt so weit), so verdoppelt sich die Arbeit ebenfalls. Experimentell lassen sich diese Plausibilitätsbetrachtung sehr schön am Flaschenzug zeigen. Die Arbeit ist also proportional zur Kraft (falls s sich nicht ändert) und proportional zum zurückgelegten Weg (falls F sich nicht ändert). Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Arbeit in folgender Weise zu definieren:

Arbeit ist das Produkt aus Kraft und Weg, sofern die Kraft längs des Weges gerichtet ist und einen konstanten Wert hat: $W = F s$. Dabei wird die Energie des Systems verändert, also: $W = \Delta E$. Das ΔE macht sich im System durch eine veränderte Lageenergie oder eine veränderte kinetische Energie bemerkbar. Die Lageenergie erhält damit auch einen Definitionsterm $E_p = mg h$, der sich auf einen Ausgangszustand des Systems bezieht. Durch die Gleichung $W = \Delta E$ haben Energie und Arbeit dieselbe Einheit. Spätestens hier ergibt sich also die Kette der Einheiten $[E] = 1\text{J} = [F s = W = \Delta E] = 1\text{ Nm} = [mgh] = 1\text{ kg m}^2/\text{s}^2$

Eine Übungsphase zur Vertiefung wird an dieser Stelle eingeschoben, wofür sich die folgenden Aufgaben eignen.

Formel für die Bewegungsenergie

Die Formel für die Bewegungsenergie gewinnt man, ausgehend von der Höhenenergie, unter Zuhilfenahme des Energieerhaltungssatzes:



Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Bewegungsenergie von der Geschwindigkeit lässt man einen Versuchswagen (möglichst geringe Reibung, Räder mit geringem Trägheitsmoment), dessen Masse zunächst unverändert bleibt, aus verschiedenen Höhen h eine schiefe Ebene hinunterfah-

ren. Eine rollende Stahlkugel als bewegter Körper eignet sich nur sehr bedingt, da $2/7$ der Gesamtenergie stets in Form von Rotationsenergie gebunden sind.

Auf einer anschließenden, waagrechten Messstrecke wird seine Geschwindigkeit mittels Lichtschranken und Stoppuhr bestimmt. Aus der Messreihe erhält man $h \sim v^2$, bzw. wegen der unveränderten Masse des Wagens $E_h \sim v^2$, bzw. wegen des Prinzips der Energieerhaltung $E_{\text{kin}} \sim v^2$.

Für die Abhängigkeit der Bewegungsenergie von der Masse wird die Masse des Wagens bei gleicher Höhe variiert. Aus dem Versuch ergibt sich, dass die Geschwindigkeit unabhängig von der Masse des Wagens ist. Da bei unveränderter Höhe $E_h \sim m$, gilt auf Grund der Energieerhaltung auch $E_{\text{kin}} \sim m$. auch: Einheitenbetrachtung der Proportionalitätskonstante zeigt die Einheit kg.

Die beiden Teilergebnisse liefern zusammen $E_{\text{kin}} \sim mv^2$. Der Proportionalitätsfaktor $1/2$ ergibt sich in der Regel mit vernünftiger Genauigkeit, er kann aber bei Bedarf den Schülerinnen und Schülern auch mitgeteilt werden.

Damit können erste einfache Aufgaben zu Energieumwandlungen zwischen Höhenenergie und Bewegungsenergie behandelt werden.

„Platzregen“

(http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph09/musteraufgaben/06energie/index.htm)

Qualitative Behandlung der Spannenergie

Die Spannenergie ist gemäß dem Lehrplan nur qualitativ zu behandeln. Dies beinhaltet, dass die Schülerinnen und Schüler verstehen, dass die in einer Feder gespeicherte Energie umso größer ist, je größer Dehnung und Federhärte sind. Ein naives Verständnis der Federhärte ist dabei ausreichend. Den mathematischen Zusammenhang zwischen Spannenergie, Federhärte und Dehnung der Feder brauchen die Schülerinnen und Schüler nicht zu kennen.

Bei den Aufgaben ist darauf zu achten, dass zwar durchaus auch mit der in einer Feder gespeicherten Energie gerechnet werden kann, Berechnungen von Dehnungen oder Federhärte jedoch entfallen.

Vertiefung und Festigung

Abschließend folgt eine ausgiebige Übungsphase zu Energieumwandlungen und dem Energieerhaltungssatz. Da die Berechnungen zu einem Zeitpunkt stattfinden, bis zu dem in der Mathematik noch keine Wurzeln behandelt wurden, sollte man keinen übertriebenen Rechenaufwand betreiben und die Wurzeltaste des Taschenrechners sehr pragmatisch einsetzen. Ansprechende Beispiele sind:

„Simulation Energiebilanz Skifahrer“

(http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph09/simulationen/06skifahrer/skifahrer.htm)