

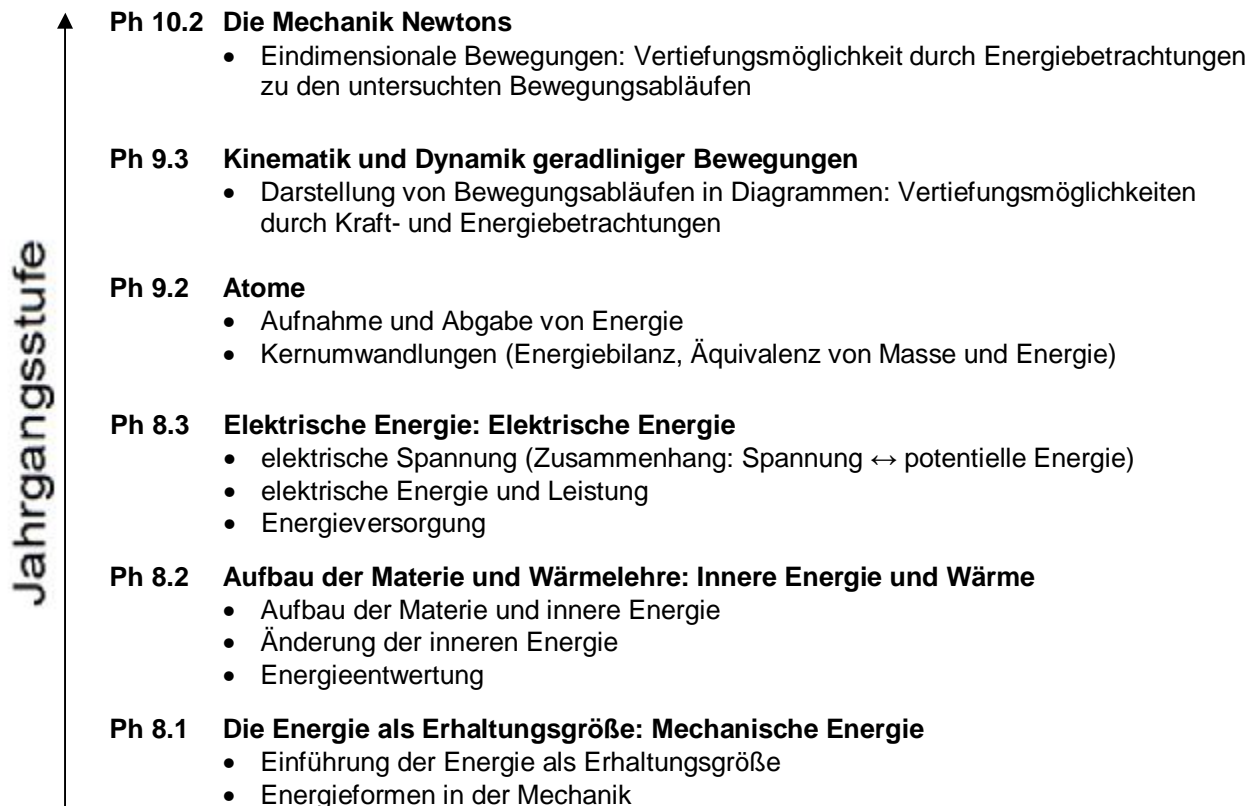
Die Energie als Erhaltungsgröße – ein Unterrichtskonzept

Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise zur Einführung des Energiebegriffs ist die Tatsache, dass sich *Energie als physikalische Größe* nur sehr schwer 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 zwar unpräzisen, prinzipiell aber korrekten Vorstellung aufzubauen und nicht, wie oft üblich, den Weg über die mechanische Arbeit zu beschreiten. Zudem erfährt so das die gesamte Physik 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.

Dennoch stellen die Erläuterungen selbstverständlich nur *eine* Möglichkeit dar, die Vorgaben des Lehrplans umzusetzen; sie sind als Anregung zu verstehen und haben zum Ziel, die Lehrer im Rahmen ihrer methodischen und didaktischen Freiheiten zu unterstützen, nicht sie einzuengen oder gar zu bevormunden.

Einbettung in den Lehrplan

Die Energieerhaltung ist das Leitthema der 8. Jahrgangsstufe, wobei das Kapitel *Einführung der mechanischen Energieformen* den Einstieg markiert; im weiteren Verlauf sind die innere und die elektrische Energie Unterrichtsgegenstand. In den darauf folgenden Jahrgangsstufen werden immer wieder Betrachtungen zur Energie angestellt, weshalb durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Basiskonzept Energie in der 8. Jahrgangsstufe ein wichtiges Fundament für die weiteren Jahrgangsstufen gelegt wird.



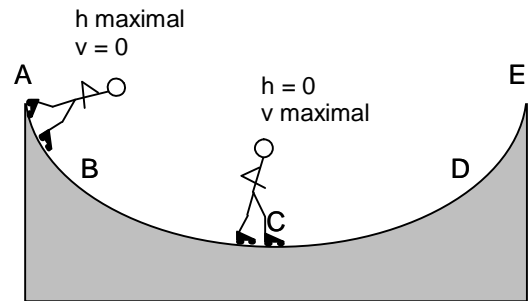
Vorkenntnisse:

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 Energiebilanzen angestrebt.

Vorgehen im Unterricht:

In direkter Anknüpfung an die Energieumwandlungen in NT 5.1.2 wird man zunächst auf qualitativem Niveau Beispiele zur Energieerhaltung betrachten. Denkbar wäre etwa direkt aus der Erfahrungswelt der Schüler die Bewegung eines Inlineskaters in einer Halfpipe:

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, wobei die folgenden Aufgaben aus der Link-Ebene zu 8.1 gut auf das hier beschriebene Vorgehen abgestimmt sind:

„Inlineskater“ (qualitative Teile)

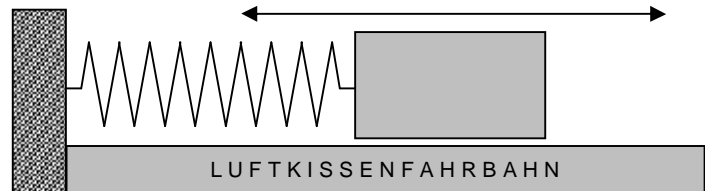
„Trampolin“ (qualitative Teile)

„Energiediagramm – Trampolin“

Auch mit den in der Link-Ebene zu 8.1 angebotenen Filmen, die zudem sehr motivierend sind, lassen sich Energieumwandlungen anschaulich beschreiben.

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, Arbeit und Bestimmung der Formeln für die Energieformen

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 Kraftwandlers 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 $F_g \cdot h = F \cdot s$ (★), 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: $W = F \cdot s$.

Einerseits ist nun die Arbeit, die aufgewandt werden muss, um dem Körper eine größere Höhenenergie zu verleihen, nach der Goldenen Regel nur vom Anfangs- und Endpunkt der Bewegung abhängig. Andererseits ist auch die Höhenenergie eine Größe, die nur von der Lage des Körpers abhängt. Es spielt also auch aus diesem Blickwinkel keine Rolle, auf welchem Weg der Körper die Höhenenergie erhalten hat. Deshalb liegt es nahe, die Differenz der Höhenenergie zwischen Anfangs- und Endpunkt mit der zugeführten Arbeit zu identifizieren, woraus sich für die Änderung der Höhenenergie die Formel $E_{h,nach} - E_{h,vor} = W$ ergibt. Wählt man als Bezugsniveau die Höhe $h_{vor} = 0$ mit $E_{h,vor} = 0$ und verwendet die Goldene Regel der Mechanik, ergibt sich die bekannte Formel $E_h = m g h$.

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

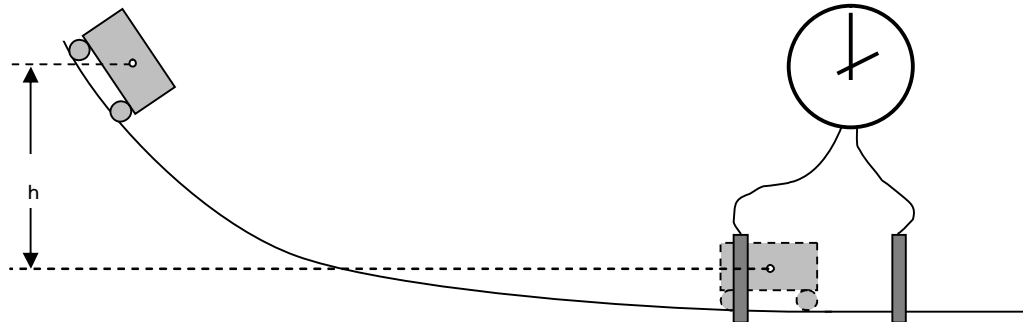
„Ungleicher Kraftakt“

(http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph08/zusatzaufgaben/09_rolleandecke/rolleandecke.htm)

„LKW Passstraße“ (Link-Ebene zu 8.1)

„Gewichtheber Reißen“ (Linkebene zu 8.1)

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 hinunterfahren. 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 $E_{\text{kin}} \sim m$.

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)

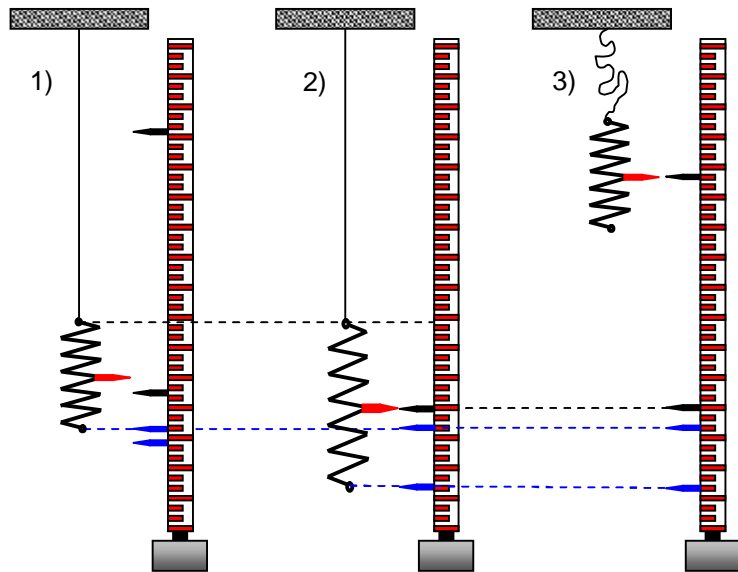
„Inlineskater“

(Link-Ebene zu 8.1)

Die Formel für die **Spannenergie** erhält man ebenfalls, indem man von der Höhenenergie ausgeht und den Energieerhaltungssatz zu Hilfe nimmt.

Eine an einem dünnen Faden hängende Spiralfeder (z. B. $D = 1,4 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$, $m = 35 \text{ g}$) erhält auf Höhe ihrer Mitte (in etwa Höhe des Schwerpunktes), einen deutlich sichtbaren Zeiger (z. B. aus rotem Papier). Mit Hilfe eines senkrecht eingespannten Maßstabes, auf dem verschiebbare Zeiger ange-

bracht sind, kann die Federdehnung sehr leicht abgelesen werden (Abstand zwischen den blauen Zeigern in Bild 2). Durch die Dehnung wird gleichzeitig der Schwerpunkt der Feder auf einen tieferen Punkt verschoben, der durch einen weiteren Zeiger (oder ein Zeiger an einem zweiten Maßstab) markiert wird. Wird die gespannte Feder losgelassen, schnellte sie nach oben, und man kann in recht gut reproduzierbaren Versuchen den höchsten Punkt der Feder durch den roten Zeiger ermitteln. In der Praxis können die Schülerinnen und Schüler im Klassenverband der roten Markierung problemlos folgen. Auch eine Auswertung über eine Videokamera ist denkbar.



Nach dem Prinzip der Energieerhaltung wurde die Spannenergie der Feder bei Erreichen des höchsten Punktes vollständig in Höhenenergie umgewandelt. Der Höhenunterschied des Massenschwerpunkts und die Masse der Feder lassen sich leicht bestimmen, wodurch sich die Höhenenergie berechnen lässt. Führt man eine Messreihe durch, erhält man im Rahmen der Messgenauigkeit $E_h \sim s^2$, bzw. wegen des Prinzips der Energieerhaltung $E_{sp} \sim s^2$.

Es ist plausibel, dass die Spannenergie bei gleicher Dehnung umso größer ist, je größer die Federhärte der verwendeten Feder ist. Dass die Spannenergie proportional zu D ist, kann den Schülern verdeutlicht werden, indem man an das Hooke'sche Gesetz $F = D \cdot s$ erinnert, nach dem die dehnende Kraft proportional zur Federhärte ist. Darüber hinaus lässt sich der oben beschriebene Versuch prinzipiell auch mit verschiedenen Federn bei gleicher Dehnung durchführen.

Die beiden Teilergebnisse liefern zusammen $E_{sp} \sim Ds^2$. Der Proportionalitätsfaktor $\frac{1}{2}$ kann den Schülerinnen und Schülern mitgeteilt werden.

Mit folgenden Aufgaben können verschiedene Beispiele von Umwandlungen durchgesprochen und durchgerechnet werden.

„Trampolinspringer“

(Link-Ebene 8.1)

„Pfeil und Bogen“

(Link-Ebene 8.1, wahlweise offenere oder enger geführte Ausgabenstellung)

„Gefährliches Tauziehen“

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

Abschließend folgt eine ausgiebige Übungsphase zu Energieumwandlungen und dem Energieerhaltungssatz in quantitativer Form. Da diese 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. Besonders schöne Beispiele sind:

„Simulation Energiebilanz Skifahrer“

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

„Stabhochsprung“

(Link-Ebene 8.1, wahlweise offenere oder enger geführte Ausgabenstellung)