Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane

Hans - Otto Carmesin
Hohenwedeler Weg 136, 21682 Stade
Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 283344 Bremen

Kurzfassung
Die Energie kann nicht durch ein einzelnes Messverfahren operationalisert werden, da sie in unterschiedlichsten Formen vorkommt. So kommt es, dass Schüler oft die Energie unzureichend von der Kraft unterscheiden. Bei der vorgestellten Einführung gehe ich von der Tatsache aus, dass Schall- sowie Lichtenergie proportional zur Schall- sowie Lichtintensität sind und daher beim Sehen und Hören unmittelbar empfunden werden. So können Schüler mit den schlichtesten experimentellen und denkerischen Mitteln den Energiebegriff qualitativ und quantitativ erfassen. Auch können sie Messgeräte durch Sinne ersetzen sowie die zum Hören, Sehen, Tasten und Temperaturempfinden nötigen Energien bestimmen, miteinander vergleichen und beurteilen. Es werden u. a. Experimente und Ergebnisse eines Unterrichtsversuchs dargestellt.

1. Einleitung

Der Energiebegriff verbindet als Erhaltungsgröße unterschiedliche Erfahrungsbereiche. Somit ist er für das Verständnis von zentraler Bedeutung [1] und erlaubt kein einheitliches Messverfahren. Daher wird er meist indirekt mit Hilfe des Begriffs Arbeit eingeführt. Hier zeige ich einen Weg, den Energiebegriff mit Hilfe menschlicher Sinne unmittelbar einzuführen [2]. Die Schüler hatten so nicht nur gute Lernerfolge. Sie bestimmten auch mit großem Interesse die Energie, die ein Reiz haben muss, damit sie ihn hören, sehen oder tasten können. Dabei stellten sie fest, dass das Sehen empfindlicher ist als das Hören und Tasten und entdeckten so das Wesen der Erhaltungsgröße: Die Energie macht scheinbar völlig unterschiedliche Erfahrungsbereiche zahlenmäßig vergleichbar.

Hier erläutere ich zunächst die psychophysischen Voraussetzungen [3] der Schüler. Dann erkläre ich die Begriffsbildung und schildere ein Experiment, bei dem ein Pendel gegen eine Trommelmembran schlägt und einen sogenannten *Pendelschlag* erzeugt, s. Abb. 1. Schließlich präsentiere ich Ergebnisse eines Unterrichtsversuchs und gebe einen Ausblick auf weitere Schülerexperimente zum Thema [2].

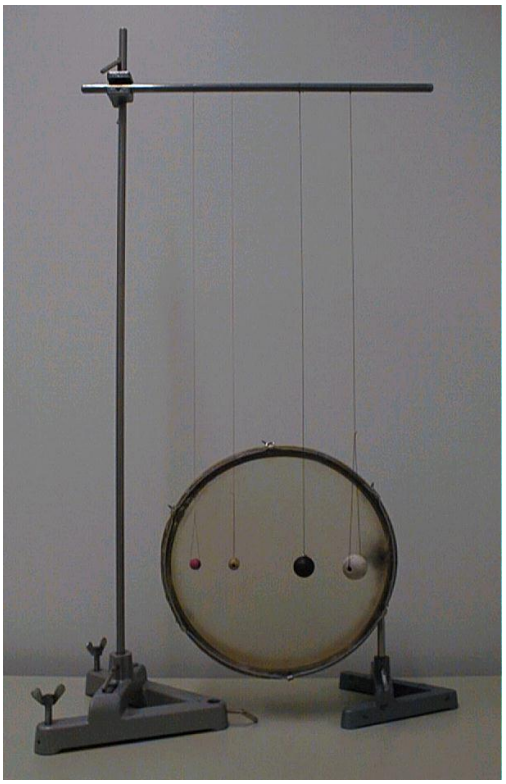


Abb. 1: **Pendelschläge:** Ein Pendel wird ausgelenkt und losgelassen, trifft auf die Trommel und erzeugt so einen Pendelschlag. Die Massen der vier Pendel sind von links nach rechts 0,4 g; 2 g; 100 g; 12 g. Mit solchen Versuchsaufbauten haben die Schüler in einem Schülerexperiment entdeckt, dass bei gleich lauten Pendelschlägen die Produkte Masse mal Höhe gleich sind. Auch haben die Schüler mit dem leichtesten Pendel festgestellt, dass der Pendelschlag aus 1 m Entfernung bei einer Auslenkung von 3 mm gerade noch zu hören ist. Die Auswertung ergab die Reizschwelle für Energie von 1,44 pJ [2].

2. Psychophysische Grundlagen

Für Messungen von Sinnesempfindungen ist es grundlegend, jeder Sinnesempfindung ein passendes Sinnesorgan sowie passende Sinneszellen und diesen einen passenden Reiz zuzuordnen: Den Reiz, auf den ein Sinnesorgan oder eine Sinneszelle optimal reagiert, bezeichnet man als *adäquat*. Auch bei inadäquater Reizung, etwa durch einen Schlag, ruft das Auge eine Lichtempfindung hervor. Entsprechend ruft das Ohr eine Hör-, die Nase eine Riech-, die Zunge eine Geschmacks-, der Tastsinn eine Tast- und der Temperatursinn eine Temperaturempfindung

hervor. Diese Empfindungen nennt man Sinnesmodalitäten. Dieser Zusammenhang wurde 1840 von Johannes Müller als *Gesetz der spezifischen Sinnesenergien* formuliert.

Für die Messung von Sinnesempfindungen haben sich zwei *Schwellen* besonders bewährt. Die kleinste Reizintensität, bei der eine bestimmte Reizanordnung eine Sinnesempfindung verursacht, heißt *Reizschwelle*. Will man Reizschwellen genau bestimmen, so ist zu beachten, dass bei geringen Reizintensitäten die Reizschwelle gesenkt wird. Dieser Vorgang heißt Adaptation. Beim Sehen erfordert das die chemische Regeneration des Sehpurpurs und dauert daher einige Minuten. Der kleinste Intensitätsunterschied zweier Reize oberhalb der Reizschwelle, der empfunden wird, heißt *Unterschiedsschwelle*.

Die Reizschwellen betragen [2] beim Sehen $3{,}5 \cdot 10^{-17}$ J bis $5{,}6 \cdot 10^{-17}$ J, beim Farbensehen 5 pJ, beim Hören von Pendelschlägen 2 pJ, beim Tasten 25 nJ und beim Warmsinn 0,063 J. 1846 formulierte Weber das sogenannte *webersche Gesetz*. Es besagt, dass der Quotient aus Unterschiedsschwelle und Reizintensität konstant ist. Die Konstante ist beim Sehen von Helligkeitsunterschieden 0,2, bei Druckreizen auf der Haut 0,03 und beim Hören 0,3. Dem entsprechen relative Intensitätsungenauigkeiten von 20%, 3% und 30%.

Innerhalb einer Sinnesmodalität kann es verschiedene *Qualitäten* geben, z. B. die Farbe beim Sehen und die Tonhöhe beim Hören. Der kleinste Reizunterschied, ab dem unterschiedliche Qualitäten empfunden werden, heißt *Qualitätsschwelle*. Die hörbaren Frequenzen liegen zwischen 16 und 20 000 Hertz. Bei 1 000 Hertz sind Unterschiede von 3 Hertz hörbar. Die sichtbaren Wellenlängen liegen zwischen 400 und 700 Nanometer. Unterschiede von 1 bis 5 Nanometer werden als verschiedene Farbtöne empfunden. Die relativen Qualitätsungenauigkeiten beim Sehen und Hören liegen daher zwischen 0,2% und 1,25%.

3. Einführung des Energiebegriffs

Sehen, Hören und Tasten sind aus folgendem Grund zur Einführung des Energiebegriffs geeignet. Ein adäquater Sehreiz besteht aus Licht, das eine Teilfläche der Netzhaut während eines Zeitintervalls aufnimmt. Damit stellt der Reiz einen Energiebetrag dar. Ebenso besteht ein adäquater Hörreiz aus Schallwellen, die während eines Zeitintervalls auf das Trommelfell treffen; der Reiz stellt somit einen entsprechenden Energiebetrag dar. Der Tastsinn kann adäquat gereizt werden, indem man die Haut eine winzige Strecke ds eindrückt. Dabei muss eine Energie aufgebracht werden, deren Betrag das Integral der benötigten Kraft längs des Weges s ist.

In allen drei Fällen wird zum Hervorrufen des Reizes ein Energiebetrag benötigt. Daher kann man sagen: *Energie ist nötig um Auge oder Ohr adäquat zu reizen.* Anhand einiger Beispiele stellten wir im Unterricht diesen Zusammenhang[1] fest.

4. Einführung gleicher Energiebeträge

Entsprechend der obigen Einführung des Energiebegriffs wird festgelegt, dass zwei Reize eines Sinnes den *gleichen Energiebetrag* haben, wenn sie gleich intensiv empfunden werden. Dies erscheint Schülern völlig plausibel.

5. Entdeckung einer Produktgleichheit bei gleich lauten Pendelschlägen

Sowie die Schüler an Beispielen erkennen können, ob Energie vorhanden ist und ob Energiebeträge gleich sind, werden Bedingungen für die Gleichheit von Energiebeträgen untersucht. Hierzu haben die Schüler gleich laute Pendelschläge mit Pendeln unterschiedlicher Masse m und unterschiedlicher Starthöhe h erzeugt. Anhand der Versuchsergebnisse haben sie die *Produktgleichheit von Masse und Höhe bei Pendelschlägen gleicher Energie* entdeckt, s. Abb. 2.

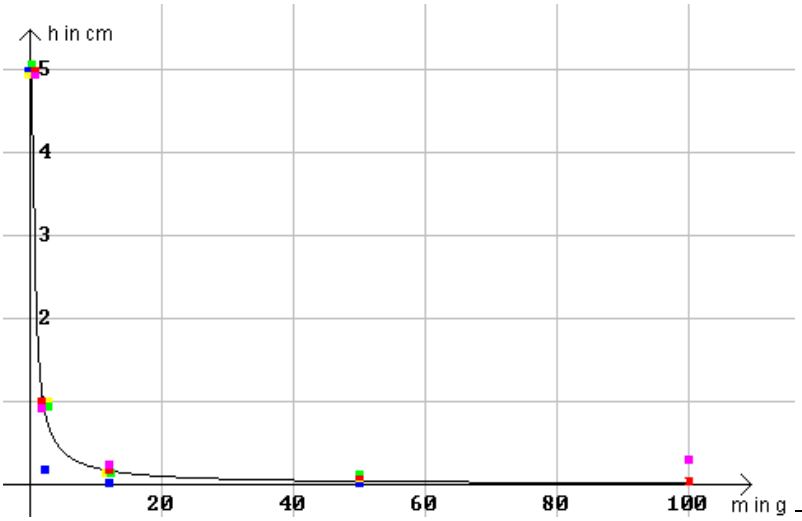


Abb. 2: Ergebnisse der Schülerversuche: Die Schüler haben für gleich laute Pendelschläge die Höhe der anfänglichen Auslenkung als Funktion der Masse dargestellt. Die Antiptoportionalität wurde überzeugend erkannt. Denn die Massen variieren um einen Faktor 250, während die Schüler mit einer Genauigkeit von 0,3 hören, s.o.

[1] Im Unterricht haben wir auch einen Merksatz formuliert [2], der für das Folgende nicht nötig ist.

6. Einführung des Energiebetrags

Das obige Experiment, s. Abb. 2, zeigt, dass die Energie E eine Funktion des Produktes m·h ist, kurz E = E(m·h). Es wäre bei diesem Zugang praktisch, wenn man sagen könnte, eine Verdopplung der Reizenergie führt zu einer Verdopplung der empfundenen Lautstärke. Das ist aber nicht der Fall, vielmehr reagieren die Sinne in nicht linearer Weise gemäß Potenzgesetzen[3]. Daher wird hier von obiger Produktgleichheit ausgegangen.

Es wird gefordert, dass die Energie bei k Pendeln unter sonst gleichen Bedingungen k mal so groß ist wie bei einem. Daher ist die Energie proportional zur Masse, denn man könnte die Pendel miteinander verbinden.

Wie ändert sich die Energie, wenn man die Höhe um einen Faktor k vergrößert? Hierbei vergrößert sich m·h um einen Faktor k. Das entspricht einer Vergrößerung der Masse um den Faktor k, denn die Energie ist eine Funktion des Produkts m·h. Also entspricht es einer Vergrößerung der Energie um den Faktor k, denn die Energie ist proportional zur Masse. Demnach ist die Energie auch proportional zur Höhe.

Insgesamt ist die Energie proportional zum Produkt m·h, denn sie ist proportional zu m und zu h. Man wählt den Ortsfaktor g als Proportionalitätskonstante und erhält für die Energie des Pendels die Gleichung:

$$E = g \cdot m \cdot h$$

7. Erhaltung der Energie

Die Erhaltung der Energie wird wie üblich mit Hilfe eines Pendelexperiments plausibel gemacht.

8. Ergebnisse des Unterrichtsversuchs

Zur Auswertung des Unterrichts wurden folgende Aufzeichnungen erstellt. Während des Unterrichts lief immer ein Tonbandgerät. Die Tafelbilder wurden fotografiert. Der Unterricht wurde von einem Kollegen protokolliert. Nach der Unterrichtseinheit wurde eine Klassenarbeit zu dem Thema geschrieben, zwei Monate später ein Nachtest. Vor und nach der Unterrichtseinheit beantworteten die Schüler einen Fragebogen.

Während des Unterrichtsversuchs waren die Schüler sehr interessiert an dem Thema und konnten Versuche mit großer Selbständigkeit auch in themendifferenzierter Gruppenarbeit planen und durchführen. Die meisten Schüler konnten in der Klassenarbeit den Energiebegriff richtig anwenden, Energieumwandlungen und -formen richtig beurteilen und Probleme mit Hilfe der Eneregieerhaltung lösen.

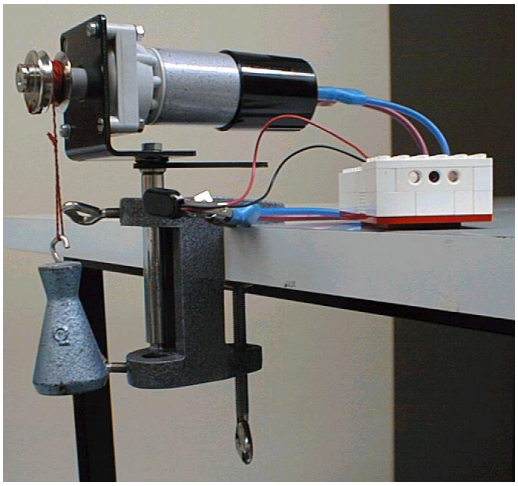
Die Fragebögen zeigten vor allem folgendes. Viele Schüler haben erst durch die Unterrichtseinheit erkannt, dass man die Empfindlichkeit unterschiedlicher Sinne miteinander vergleichen kann. Sie haben damit das *Wesen der Energie als einer Invarianten, die unterschiedlichste Erfahrungsbereiche verbindet, anhand ihrer Sinne entdeckt*.

9. Ausblick

In der Unterrichtseinheit haben wir auch die Reizschwellen für Sehen und Tasten bestimmt, auch habe ich die Reizschwellenbestimmung für Wärmereize vorbereitet [2]. Beim Sehen haben wir die von einer Lampe abgestrahlte Energie grob mit Hilfe eines Generators gemessen, s. Abb. 3. Später wurde in Schülerexperimenten die abgestrahlte Energie mit Hilfe von Filterfolien variiert, deren Transmissionkoeffizient mit Hilfe des R^{-2} - Abstandsgesetzes festgestellt wurde. Damit bestimmten die Schüler ihre Reizschwellen beim Sehen.

Die Schüler bestimmten ihre Reizschwelle beim Tasten, indem sie ein Pendel gegen ihre Haut auftreffen ließen. Sie stellten fest, ab welcher anfänglichen Höhe der Pendelschlag auf die Haut spürbar war und berechneten die entsprechende Energie.

Abb. 3: Ein herabsinkendes Gewichtsstück (links)



bringt eine Lampe (rechts) zum Leuchten. Eine zweite baugleiche mit einer Batterie betriebene gleich helle Lampe sendet die gleiche Energie pro Zeit aus.

10. Zusammenfassung

Der Energiebegriff kann in einer Klasse 9 mit menschlichen Sinnesorganen eingeführt werden. Weil dabei die schlichtesten experimentellen und denkerischen Mittel eingesetzt werden, kann man mit fünf Unterrichtsstunden auskommen, indem man sich auf das Hören beschränkt. In der durchgeführten Unterrichtseinheit wurden in zwölf Stunden Hören, Sehen und Tasten behandelt und die Reizschwellen für Energie bestimmt.

Nachteile dieses Zugangs sind die teils ungenauen Versuche und die nicht lineare Antwort der Sinne auf die Reizenergie. Beide Nachteile führten weder zu Lernschwierigkeiten noch zu

einer verringerten Motivation der Schüler und sind daher geringfügig. Trotz der nicht linearen Antwort der Sinne auf die Energie der Reize kann man die Gleichung für die Lageenergie $E = g \cdot m \cdot h$ mit Hilfe des Hörens experimentell bestimmen, wenn man nur noch fordert, dass k Pendel unter sonst gleichen Bedingungen k mal so viel Energie haben wie eines, s. o.

Folgende **Vorteile** dieses Zugangs fielen auf: Die Einführung der Energie mit Sinnen vermeidet die sonst häufige unzureichende Unterscheidung der Energie von der Kraft und bringt keine begrifflichen Schwierigkeiten mit sich. Die Schüler erreichen die Lernziele relativ selbständig und nachhaltig, s. Klassenarbeit und Nachtest [2]. Bei dieser Unterrichtseinheit sind die Schüler aus guten Gründen motiviert: Sie arbeiten von der ersten Stunde an gemeinsam an der Beantwortung einer interessanten Leitfrage: Ist Sehen empfindlicher als Hören? Dabei lernen sie das Denken der Physiologie kennen und erfahren die physikalische Methode am eigenen Körper. Sie lernen, Energie mit Hilfe von Sehen und Hören zu erkennen. Sie entdecken durch problemlösendes Experimentieren weitgehend selbständig den Energiebetrag sowie die Energieerhaltung und nutzen diese als Schlüssel zur Beantwortung der Leitfrage. Mit der Antwort steigern sie auch ihr Verständnis und Urteilsvermögen über ihre Sinnesempfindungen.

Literatur

[1] Piaget, J.: Psychologie der Intelligenz. Stuttgart 1984. S. 170 f.

[2] Carmesin, H.-O.: Einführung des Energiebegriffs unter Einbeziehung ausgewählter menschlicher Sinnesorgane. Ein Unterrichtsversuch im Fach Physik in einer Klasse 9 eines Gymnasiums. Zweite Staatsexamensarbeit. Studienseminar Stade für das Lehramt an Gymnasien. Stade 1998.

[3] Von Campenhausen, Ch.: Die Sinne des Menschen. Stuttgart 1981 Bd. I.

Carmesin, Hans-Otto: Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft, Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, 2001.