

Energie und Energieerhaltung am Beispiel des Fadenpendels

Tobias Allmers^{1,*} & Matthias Wilde²

¹ *Kreisgymnasium St. Ursula Haselünne*

² *Universität Bielefeld*

* *Kontakt: Kreisgymnasium St. Ursula Haselünne,
Klosterstr. 1, 49740 Haselünne
tobias.allmers@kgsuhaseluenne.de*

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden die Bedeutung von Energie, Arbeit und Energieerhaltung behandelt und die empirische Überprüfung des Energieerhaltungssatzes am Beispiel eines Fadenpendels vorgestellt. Neben der Einführung von experimentellen Arbeitstechniken zur Bestimmung der potentiellen und kinetischen Energie werden die Berücksichtigung von Messgenauigkeit und die Angabe von signifikanten Ziffern vorgenommen. Im Kontext dieses Themenheftes der Zeitschrift *PraxisForschungLehrer*innenBildung* sind der Begriff „Energie“ und das Konzept der Energieerhaltung für die Interpretation experimenteller Daten aus den anschließenden Experimenten notwendig.

Schlagwörter: Experimentieren, Scientific Inquiry, Fadenpendel, Energieerhaltung, Unterrichtskonzept



1 Einleitung

Energie ist eine abstrakte Größe, die sich einer direkten Messung entzieht. Bemerkbar macht sich Energie, wenn Prozesse ablaufen, die dann unter einem Austausch von Energie vonstattengehen. Die Energie tritt dabei in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf, z.B. als innere Energie, elektrische Energie oder mechanische Energie. Ob ein Prozess ablaufen kann oder nicht, ist vom Energiegehalt eines Systems abhängig, da Energie eine Erhaltungsgröße ist. Sie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Erscheinungsform in eine andere umgewandelt werden. Da noch nie eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes beobachtet wurde (Feynman, 2011), wird der Energieerhaltungssatz in den Naturwissenschaften auch als Postulat aufgefasst, wodurch er die Grundlage für das Verständnis physikalischer und chemischer Prozesse liefert (Feynman, 1996). Der Energieerhaltungssatz ist zu einer zentralen Erkenntnis in der Physik geworden.

In diesem Beitrag wird zu der Unterrichtseinheit „Energie und Arbeit“ ein Schülerexperiment vorgestellt, das die Energieumwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie unter Berücksichtigung der Energieerhaltung betrachtet. Durch die Durchführung, Auswertung und Interpretation des Experiments werden die fachliche und überfachliche Bedeutung von Energie und Arbeit sowie der Austausch der Energie mit der Umgebung erfahrbar gemacht (KMK, 2004).

2 Grundbegriffe

Energie und Arbeit sind grundlegende Begriffe in der Physik zur Beschreibung von Vorgängen. Nachfolgend werden die für die Durchführung des unterrichtspraktischen Vorhabens notwendigen Begriffe vorgestellt.

2.1 Arbeit und Energie

Für die Beschleunigung eines Körpers ist eine Kraft notwendig. Kraft F und Beschleunigung a sind proportional zueinander. Zusammen mit der Masse m des Körpers gilt $F = m \cdot a$ (Smith, 2008). Die Kraft hat die Einheit $[F] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 = 1 \text{ Newton} = 1 \text{ N}$. Verschiebt man einen Körper um eine Strecke s , so leistet die Kraft F entlang des Weges s die Arbeit $W = F \cdot s$. Die Einheit der Arbeit ist $[W] = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J}$ (Kuhn, 2003, S. 52f.).

Wird Arbeit an einem System geleistet, erhöht sich die Energie des Systems und damit auch seine Arbeitsfähigkeit. Es kommt damit zu einem Energietransfer von einem System in das andere. Abbildung 1 auf der folgenden Seite zeigt den allgemeinen Fall, bei dem System B Arbeit am System A leistet. Die Energie des Systems A nimmt um den Betrag der geleisteten Arbeit zu, während die Energie von System B abnimmt. Die von System B geleistete Arbeit W_B wird nach einer Konvention mit einem negativen Vorzeichen versehen. Die an dem System A verrichtete Arbeit W_A ist ihrerseits positiv, da die Energie des Systems A zunimmt (Kuhn, 2003).

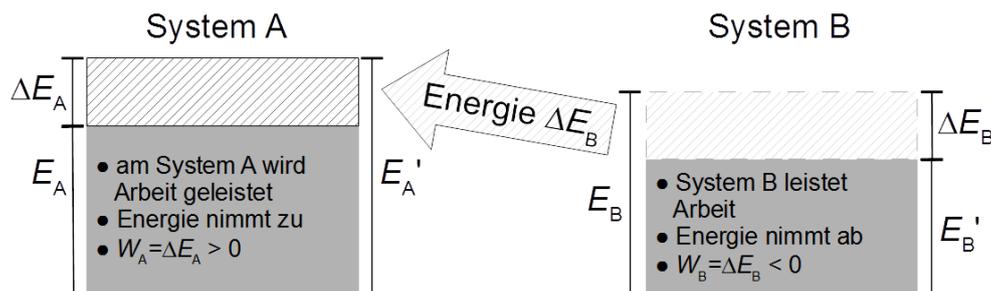


Abbildung 1: Energietransfer von System B zu System A. System B leistet die Arbeit W_B an System A. Die Energie von System B nimmt um ΔE_B ab, während die Energie von System A um den gleichen Betrag zunimmt. (eigene Darstellung)

Wird beispielsweise ein Körper im Schwerfeld der Erde angehoben, dann erhöht sich die Arbeitsfähigkeit des Systems, welches aus dem massebehafteten Körper und dem Schwerfeld besteht. Die beim Anheben des Körpers geleistete Hubarbeit ist im System Erde-Körper in Form von potentieller Energie (Lageenergie) gespeichert. Die Arbeitsfähigkeit des Systems erhöht sich um die ihm zugeführte Energie. Wird der Körper anschließend losgelassen, leistet das System Beschleunigungsarbeit. Die potentielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt. Unmittelbar vor dem Aufprall auf den Boden ist seine kinetische Energie am größten. Ein Energieübertrag auf ein anderes System findet beispielsweise statt, wenn dieser Körper beim Absinken auf den Boden einen anderen Körper eine Strecke zieht oder über eine Umlenkrolle anhebt.

In dem gewählten Beispiel gilt es zusätzlich zu beachten, dass beim Aufprall des Körpers auf den Boden die kinetische Energie in thermische Energie umgewandelt wird (Demtröder, 1998; Haber-Schaim, Dodge, Gardner & Shore, 1991). Es kommt dadurch zu einem Energieübertrag auf die Umgebung. Ist hingegen der Körper als Fadenpendel aufgehängt, so wird die potentielle Energie periodisch in kinetische Energie und zurück in potentielle Energie umgewandelt. Allerdings kommt es auch hier aufgrund von Reibung zu einem Energieübertrag durch Wärme auf die Umgebung. Die thermische Energie steht dem System zur Umwandlung von potentieller in kinetische Energie nicht mehr zur Verfügung, wodurch letztendlich die Pendelbewegung zum Erliegen kommt (Haber-Schaim et al., 1991).

2.2 Energieformen

Energie ist eine abstrakte Größe, da man einem Objekt nicht ansehen kann, ob es eine größere Energie als ein anderes Objekt hat. Auch ist Energie nicht mit einem Objekt verbunden, sondern bezieht sich auf die Arbeitsfähigkeit eines Systems. Die Änderung des energetischen Zustands eines Systems beschreibt die Veränderung von dessen Arbeitsfähigkeit. Damit ist Energie eine (abstrakte) Rechengröße.

Energie kann verschiedene Formen annehmen und zwischen diesen umgewandelt werden. Für das Experiment ist das Verständnis der mechanischen Energieformen (potentielle und kinetische Energie) und der thermischen Energie notwendig.

2.2.1 Potentielle Energie

Wird an einem Körper mit der Masse m im Schwerfeld der Erde mit der Fallbeschleunigung g Hubarbeit $W_{\text{hub}} = m \cdot g \cdot h$ geleistet, dann erhöht sich das Arbeitsvermögen des Systems aufgrund der Vergrößerung der Höhe h . Das Arbeitsvermögen, das ein System aufgrund seiner Lage besitzt, wird als potentielle Energie bezeichnet. Der Nullpunkt der potentiellen Energie ist frei wählbar (Grehn & Krause, 2007). Es kommt also nur auf die Höhendifferenz Δh an. Die Änderung der potentiellen Energie eines Körpers beträgt

demnach $\Delta E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \Delta h$. Gemäß dem Energieübertrag nach Abbildung 1 gilt: $E_{\text{pot}} = W_{\text{hub}}$ (Kuhn, 2003, S. 55).

2.2.2 Kinetische Energie

Wirkt eine gleichbleibende Kraft F auf einen Körper mit der Masse m entlang des Weges s , dann wird dieser mit $a = F/m$ gleichmäßig beschleunigt. Die geleistete Arbeit $W_{\text{besch}} = F \cdot s$ ist die Beschleunigungsarbeit. Das Arbeitsvermögen, das der Körper nun aufgrund seiner Geschwindigkeit hat, ist $E_{\text{kin}} = F \cdot s$. Mit $F = m \cdot a$ gilt $E_{\text{kin}} = m \cdot a \cdot s$.

In Abhängigkeit von der Zeit t gilt für den zurückgelegten Weg $s = 1/2 at^2$ (Grehn & Krause, 2007, S. 20). Damit folgt für die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = ma(1/2)at^2$ bzw. $E_{\text{kin}} = 1/2 m(at)^2$. Für die Geschwindigkeit v gilt $v = a \cdot t$. Es ergibt sich damit für die kinetische Energie $E_{\text{kin}} = 1/2 mv^2$. Die Änderung der kinetischen Energie ist entsprechend $\Delta E_{\text{kin}} = 1/2 m(\Delta v)^2$. Für diese gilt $\Delta E_{\text{kin}} = W_{\text{besch}}$ (Kuhn, 2003, S. 56).

2.2.3 Thermische Energie durch Reibung

Wärme ist thermische Energie, die sich mikroskopisch betrachtet durch die (ungeordnete) Bewegung von Teilchen und durch Abstrahlung von Wärmestrahlung bemerkbar macht (Grehn & Krause, 2007). Energieumwandlung von mechanischer in thermische Energie steigt mit zunehmender Reibung, z.B. aufgrund einer rauerer Oberfläche, größeren Geschwindigkeit in gasförmigen oder flüssigen Medien oder aufgrund eines längeren Weges, auf dem ein Körper der Reibung ausgesetzt ist (Grehn & Krause, 2007). Bei der Umwandlung von mechanischer Energie in thermische Energie kommt es zu einer Energieentwertung. Im Allgemeinen steht Wärme nicht mehr als Energie für mechanische Prozesse zur Verfügung (Schlichting, 2000). Mechanische Prozesse ohne kontinuierliche Energiezufuhr kommen daher unter Einwirkung von Reibung zum Erliegen (Haber-Schaim et al., 1991). Ist die Reibung hingegen vernachlässigbar, so ist auch der „Energieverlust“ vernachlässigbar klein, und es kommt praktisch nur zu einer Umwandlung zwischen potentieller und kinetischer Energie.

2.3 Energieerhaltung und ihre Anwendung

Bei der obigen Thematisierung des Energietransfers wurde deutlich, dass die an einem System geleistete Arbeit zu einer Speicherung der Energie des Systems führt. Die Summe aller beteiligten Energien, die Gesamtenergie, ändert sich nie. „Fehlt“ Energie, so kann das daran liegen, dass der Energieaustausch mit der Umgebung nicht berücksichtigt wurde oder ein Prozess nicht vollständig verstanden ist (Feynman, 2011).

Der Energieerhaltungssatz ist für das Verständnis einer Vielzahl von Vorgängen in Technik und Physik notwendig. Nachfolgend wird dies an je einem für das unterrichtspraktische Vorhaben relevanten Beispiel illustriert.

2.3.1 Schiefe Ebene

Flaschenzüge, Hebel und schiefe Ebenen sind einfache Werkzeuge zum Heben von Lasten. Mit ihnen lässt sich die aufzuwendende Kraft reduzieren (Bader & Dorn, 1991). Der Kraftaufwand, mit dem ein Körper mit der Masse m eine schiefe Ebene hinaufgezogen wird, reduziert sich in Abhängigkeit des Anstellwinkels φ der Ebene auf $F = m \cdot g \cdot \sin(\varphi)$ (vgl. Abb. 2 auf der folgenden Seite). Für die Länge des Weges gilt $s = h \cdot \sin(\varphi)^{-1}$. Daraus folgt, dass die Arbeit (bei fehlender Reibung) konstant bleibt und gemäß der Definition der Hubarbeit nur von der Höhe h abhängt. Eine technisch relevante Anwendung könnte daher sein, den Anstellwinkel einer schiefen Ebene für eine gegebene Kraft zu berechnen.

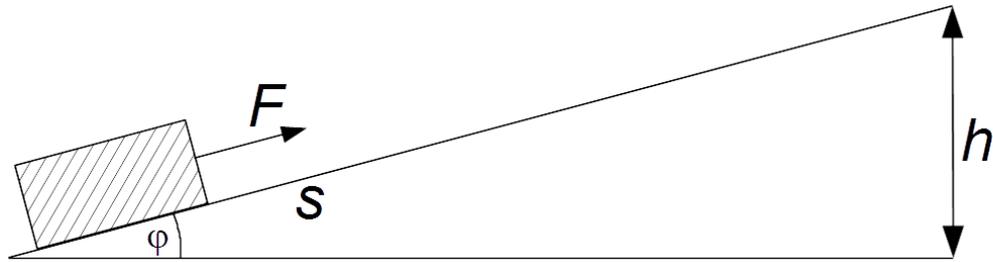


Abbildung 2: Ein Körper wird entlang einer schiefen Ebene mit der Kraft F entlang des Weges s auf die Höhe h gezogen. (eigene Darstellung)

2.3.2 Fadenpendel

Mit einem Fadenpendel wird in der Physik ein schwerer und kleiner Pendelkörper bezeichnet, der an einem leichten Faden möglichst reibungsfrei aufgehängt ist. Hiermit kann die periodische Umwandlung von potentieller in kinetische Energie betrachtet werden. Das Pendel wird dazu aus seiner Ruhelage (tiefster Punkt der Bahn in Abb. 3) ausgelenkt, indem Hubarbeit an dem System geleistet wird. Nach Loslassen des Pendels wird dieses entlang des Kreisbogens in Richtung Ruhelage beschleunigt. Die potentielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt. Aufgrund der Trägheit des Pendelkörpers überschießt dieser die Ruhelage. Das Pendel steigt unter Umwandlung von kinetischer Energie in potentielle Energie entlang der Bahn auf und erreicht auf der anderen Seite der Ruhelage fast die gleiche Höhe wie zuvor bei der Auslenkung. Die genaue Höhe ist davon abhängig, wie viel mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt wurde. Verantwortlich für die Schwingung des Pendels ist die periodische Umwandlung von potentieller und kinetischer Energie.

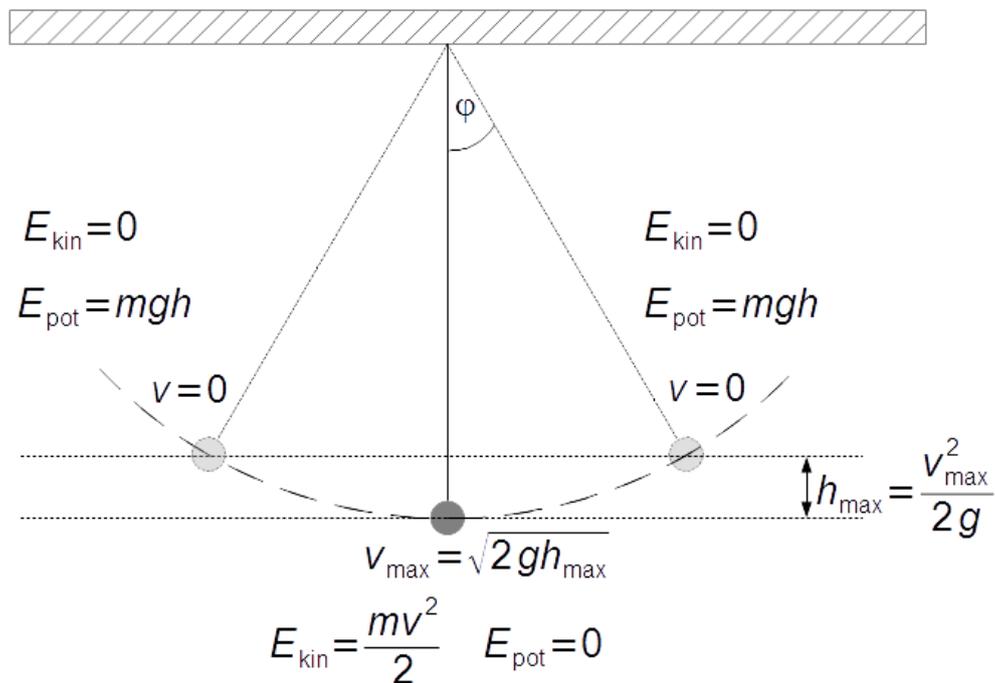


Abbildung 3: Energieumwandlung beim Fadenpendel. Vor dem Loslassen beträgt die kinetische Energie $E_{\text{kin}}=0$. Die potentielle Energie E_{pot} ist maximal. Nach dem Loslassen beschleunigt der Pendelkörper, und die potentielle Energie sinkt, während die kinetische Energie steigt. Beim Durchgang durch den tiefsten Punkt ist die kinetische Energie maximal und die potentielle Energie $E_{\text{pot}}=0$. (eigene Darstellung)

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes lässt sich bei vernachlässigbarer Reibung durch einen einfachen energetischen Ansatz die Geschwindigkeit an jedem Punkt der Bahn berechnen. Hierfür wird der Teil der potentiellen Energie betrachtet, der bereits in kinetische Energie gewandelt wurde. Der Pendelkörper erreicht beispielsweise seine maximale Geschwindigkeit v_{\max} , wenn dieser durch die Ruhelage geht. v_{\max} ergibt sich aus der ursprünglichen potentiellen Energie, gegeben durch die maximale Höhe h_{\max} . Bei vollständiger Umwandlung gilt $E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$. Hieraus folgt unmittelbar $1/2 mv_{\max}^2 = mgh_{\max}$ bzw. $v_{\max} = \sqrt{2gh_{\max}}$.

Umgekehrt kann auch die maximale Höhe berechnet werden, die das Pendel auf der anderen Seite der Ruhelage aufgrund seiner maximalen Geschwindigkeit erreichen wird. Für diese gilt unter dem gleichen Ansatz wie oben $h_{\max} = v_{\max}^2 \cdot 2g$ (Kuhn, 2003, S. 56 und S. 59). Ist wie in einem realen System Reibung vorhanden, so kann der Anteil der entwerteten mechanischen Energie aus der Verringerung der maximalen Höhe bestimmt werden.

Das Beispiel der Energieumwandlung beim Fadenpendel illustriert das prinzipielle Vorgehen zur Berechnung von Größen durch Anwendung des Energieerhaltungssatzes, wie es für eine Vielzahl von physikalischen Problemen verwendet wird.

3 Das Schülerexperiment und methodische Aspekte

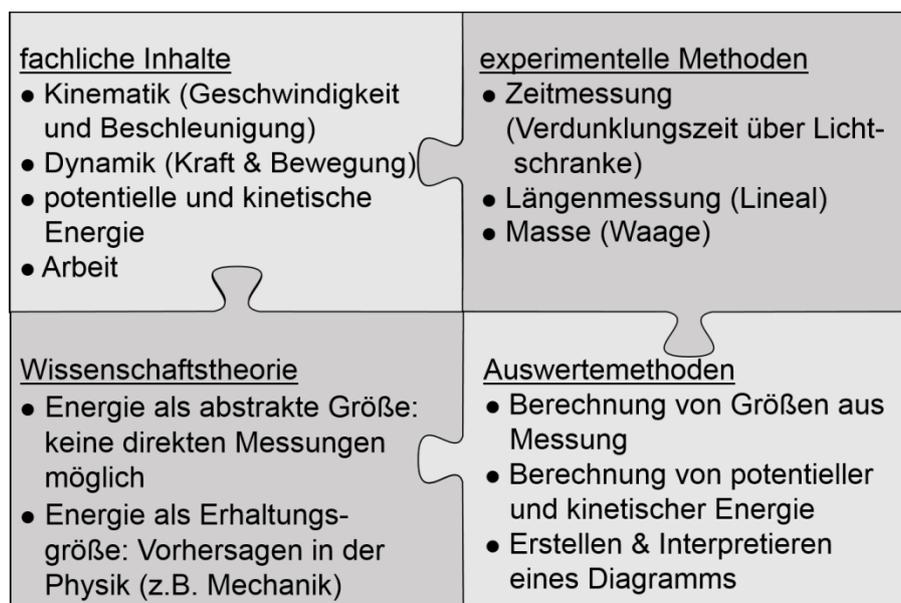


Abbildung 4: Übersicht über die fachlichen und überfachlichen Inhalte und Kompetenzen (eigene Darstellung)

3.1 Zeitplanung / Unterrichtsplanung

Die Unterrichtseinheit (vgl. Abb. 4) ist in ihrer Grundkonzeption auf vier Doppelstunden ausgelegt. Es wechseln sich dabei Erarbeitungsphasen im Plenum und praktische Arbeitsphasen ab. In den Erarbeitungsphasen wird neben Planung und Durchführung des Experiments zur Überprüfung der Energieerhaltung die fachgerechte Berücksichtigung und Angabe von Messgenauigkeiten durch signifikante Ziffern besprochen. In Ergänzung zu den bereits erworbenen Kenntnissen bei der Erstellung von Diagrammen wird das Einzeichnen von ausgleichenden Kurven und das Beschreiben sowie Interpretieren von Diagrammen thematisiert und durch die Betrachtung der im Experiment erhobenen

Daten zur Anwendung gebracht (Näheres zu den einzelnen Kompetenzen zur Auswertung und ihrer Einbindung in ein Gesamtkonzept findet sich bei Stiller, Allmers, Stockey & Wilde, eingereicht).

Der Einstieg in die Unterrichtseinheit geschieht über die Erarbeitung wesentlicher Merkmale von Energie und deren unterschiedlichen Erscheinungsformen sowie des Begriffs der Arbeit. Energie soll dabei als die Arbeitsfähigkeit eines Systems verstanden werden, die sich durch Arbeit an diesem System erhöhen lässt. Dies lässt sich durch einen Vorversuch verdeutlichen, bei dem ein Körper einmal entlang einer schiefen Ebene hinaufgezogen und einmal senkrecht um die gleiche Höhe angehoben wird. In beiden Fällen ist die aufzuwendende Arbeit gleich und im System gespeichert.

Die erhöhte Arbeitsfähigkeit des Systems wird deutlich, wenn der Gegenstand losgelassen wird und das System Beschleunigungsarbeit leistet. Aus dem Vorversuch ergibt sich das Verständnis, dass Energie gespeichert werden kann, was die Energie als Erhaltungsgröße plausibel macht. Relevante Energieformen sind hier die potentielle und kinetische Energie sowie die thermische Energie, die durch Reibung aus der kinetischen Energie entsteht.

In einem geleiteten Unterrichtsgespräch lässt sich eine geeignete Hypothese für das Schülerexperiment erarbeiten, wie z.B.: „Die potentielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt.“ Die experimentelle Überprüfung findet über die Energieumwandlung am Fadenpendel statt. Die unumgängliche Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme aufgrund von Reibung macht eine Vertiefung der Hypothese notwendig. Die potentielle Energie kann nicht vollständig in kinetische Energie umgewandelt werden, da die abgegebene thermische Energie dem System nicht mehr als mechanische Energie zur Verfügung steht. Damit eine Überprüfung des Energieerhaltungssatzes trotz auftretender Reibung möglich ist, wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Abgabe von Wärme mit kleinerem Höhenunterschied (und damit mit geringerer potentieller Energie) abnimmt.

Für das unterrichtspraktische Vorhaben gilt es zu beachten, dass die Schüler*innen unterschiedliche Vorerfahrungen mit den zur Bestimmung der kinetischen Energie notwendigen Messgeräten (Messschieber und Waage) haben und hier entsprechend angeleitet werden müssen (Stiller, Hahn, Stockey & Wilde, S. 5–16 in diesem Heft; Stiller, Stockey, Hahn & Wilde, eingereicht). Vor der Durchführung der Messungen ist die Einführung in den Umgang mit Lichtschranken zur Zeitmessung zusammen mit einer angemessenen Übungsphase sinnvoll, um die kognitive Belastung aus nicht zwingend aufgabenbezogener Beanspruchung gering zu halten (Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998).

3.2 Methodische Einbindung

Entsprechend der Kompetenztreppen für das naturwissenschaftliche Arbeiten (Stiller et al., S. 5–16 in diesem Heft; Stiller, Allmers et al., eingereicht) finden alle Entscheidungen zu dem experimentellen Vorgehen in einer Schüler*innen-Lehrer*innen-Interaktion statt (vgl. Online-Supplement, Material 1). Die getroffenen Entscheidungen werden in einer entsprechenden Experimentieranleitung festgehalten (vgl. Online-Supplement, Material 2), die allen Schüler*innen als Grundlage für die Durchführung der Experimente dient.

Die im Experiment in Partnerarbeit erhobenen Daten werden entsprechend eines Arbeitsblatts als Hilfestellung innerhalb dieser Kleingruppe ausgewertet (vgl. Online-Supplement, Material 3). Das Arbeitsblatt wird durch die Lehrkraft zur Verfügung gestellt. Für das Erstellen von Liniendiagrammen ist noch mit einer deutlichen Betreuung durch die Lehrenden zu rechnen. Neben dem Erstellen von Diagrammen findet ein Kompetenzaufbau im Umgang mit Diagrammen durch das Auffinden und Einzeichnen von Ausgleichsgeraden und durch die Beschreibung von Diagrammen statt. Für die Überprüfung der Hypothese ist die korrekte Interpretation der Ergebnisse notwendig, damit die

auftretende Umwandlung der mechanischen Energie in thermische Energie richtig im Kontext der Energieerhaltung eingeordnet werden kann.

Die Werte der gesuchten Energiebeiträge sind nur durch die Messung von verschiedenen Größen über die Anwendung von Definitionsgleichungen zugänglich. Dies motiviert die Thematisierung von absoluten Messgenauigkeiten und die sachgerechte Angabe von Ergebnissen aus Rechnungen durch die Berücksichtigung von signifikanten Ziffern (Stiller, Allmers et al., eingereicht). In diesem Zusammenhang wird ebenfalls thematisiert, welche Messgröße in ihrer Genauigkeit verbessert werden muss, damit sich die Genauigkeit der aus mehreren Messergebnissen zusammengesetzten Größe steigert. Für kommende empirische Untersuchungen kann so eine verbesserte Auswahl von geeigneten Messgeräten vorgenommen werden.

3.3 Durchführung und Auswertung

3.3.1 Vorversuch zur Hypothesenbildung

Für den Vorversuch wird ein schwerer Gegenstand mit leichtgängigen Rollen um eine bestimmte Höhe h angehoben. Das Anheben geschieht einmal entlang einer schiefen Ebene mit unterschiedlichen Steigungen und einmal lotrecht nach oben. In beiden Fällen wird die Kraft zum Ziehen bzw. Anheben des Wagens mithilfe eines Kraftmessers bestimmt (vgl. Abb. 5). Im Falle des Ziehens muss die Kraftmessung vorgenommen werden, wenn der Wagen bereits in Bewegung ist, da sonst eine zu große Kraft F aufgrund der Haftreibung gemessen werden würde (die kleinere Rollreibung ist durch die leichtgängigen Rollen gegeben und ist unter günstigen Umständen innerhalb der Genauigkeit der Kraftmessung zu vernachlässigen). Der zurückgelegte Weg s bis zum Erreichen der Höhe h wird mit einem Lineal gemessen. Die aufgewendete Arbeit wird über $W_{\text{hub}} = F \cdot s$ berechnet.

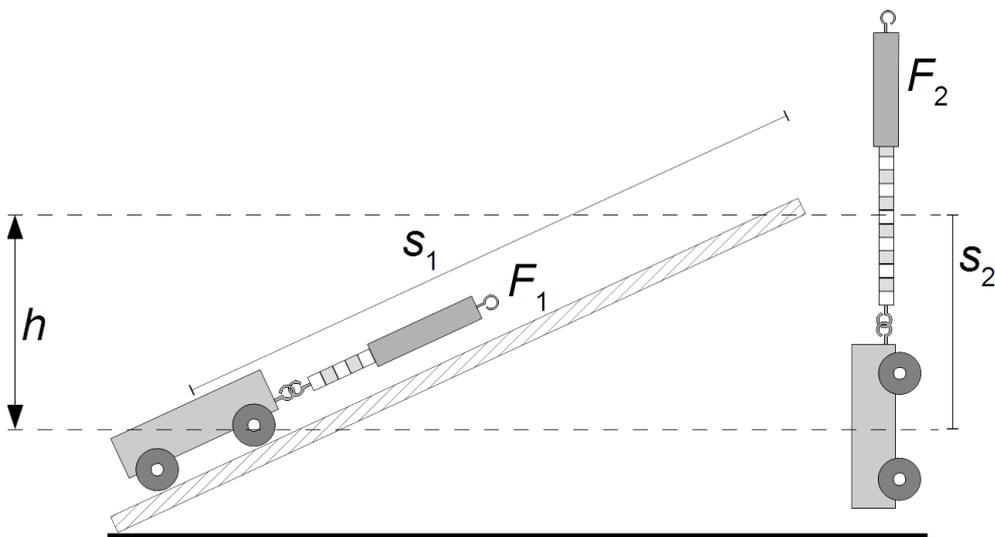


Abbildung 5: Ein Wagen wird auf zwei verschiedene Weisen um die gleiche Höhe h angehoben: i) entlang einer schiefen Ebene und ii) lotrecht nach oben. Im ersten Fall greift eine Kraft F_1 entlang des Weges s_1 an. Im zweiten Fall greift eine größere Kraft F_2 entlang des kürzeren Weges s_2 an. (eigene Darstellung)

3.3.2 Experiment zur Überprüfung der Energieerhaltung

Durch den Vorversuch wird deutlich, dass die Hubarbeit in Form von potentieller Energie gespeichert wurde. In diesem Experiment soll der Energieerhaltungssatz überprüft werden, indem die potentielle Energie eines Systems in kinetische Energie umgewandelt wird.

Eine geeignete Hypothese für das Experiment unter Berücksichtigung von Reibung ist: „Die potentielle Energie wird bei vernachlässigbaren Verlusten durch Reibung vollständig in kinetische Energie umgewandelt. Reibungsverluste führen zu einem Verlust an kinetischer Energie.“

Eine Realisierung des Versuchs findet mithilfe eines Fadenpendels statt, das an einem Stativ befestigt wird (vgl. Abb. 6). Die potentielle Energie wird über die Auslenkung des Fadenpendels eingestellt. Ein Scherentisch dient als Möglichkeit, die hierfür notwendige Höhendifferenz Δh zuverlässig und reproduzierbar einzustellen (zur Definition von Δh siehe Abb. 7 auf der folgenden Seite). Mithilfe einer Lichtschranke wird die Verdunklungsdauer beim Durchgang des Pendelkörpers am tiefsten Punkt der Bahn gemessen. Über den Durchmesser des zylindrischen Körpers kann so seine Geschwindigkeit für die verschiedenen Auslenkungen bestimmt werden. Mit der bekannten Masse des Pendelkörpers lassen sich die jeweiligen potentiellen und kinetischen Energien berechnen. Mit größer werdender Auslenkung ist zu erwarten, dass mehr kinetische Energie in Wärme umgewandelt wird (vgl. Kap. 2.2).

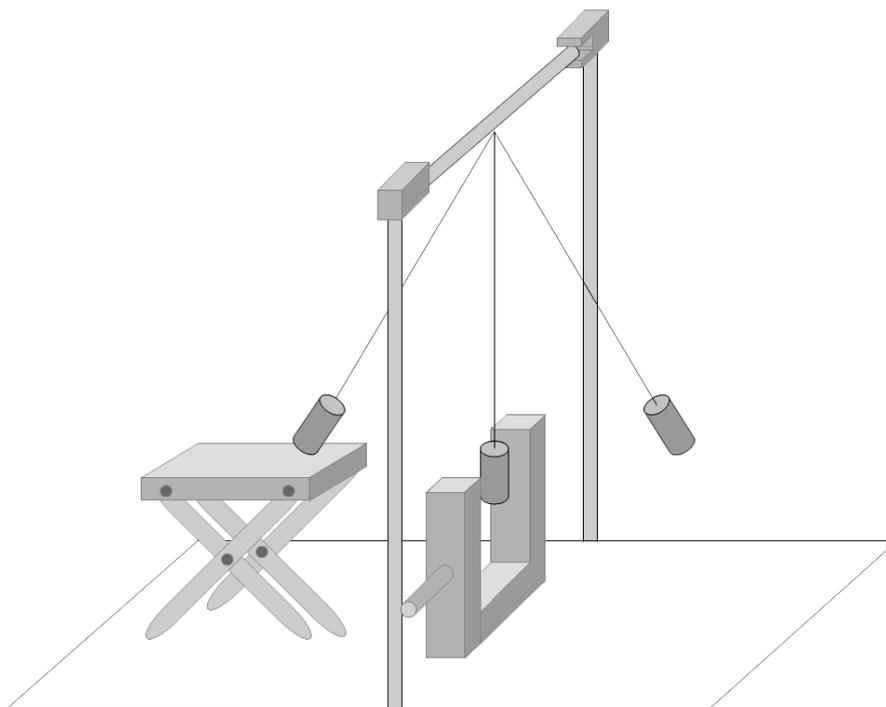


Abbildung 6: Experimentelle Realisierung zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines zylindrischen Pendelkörpers über die Verdunklungsdauer, gemessen mit einer Gabellichtschranke (Versorgung der Lichtschranke ist nicht gezeigt). (eigene Darstellung)

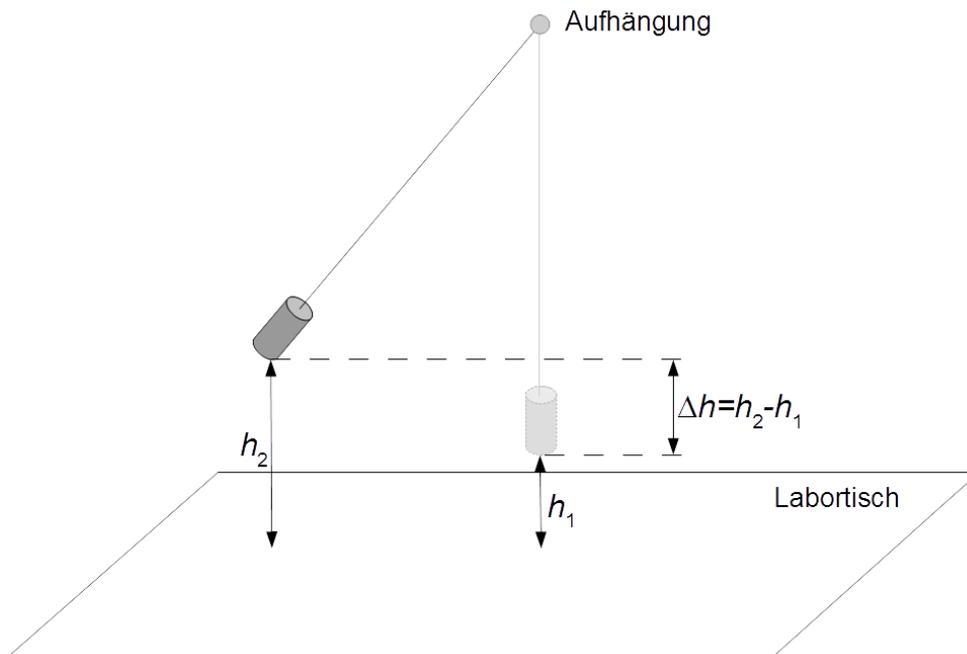


Abbildung 7: Zur Definition der Höhe Δh . Die Höhe Δh ergibt sich aus der Differenz der Höhe des ausgelenkten Pendelkörpers und der Höhe in seiner Ruhelage. Die Höhen werden jeweils von der Oberseite des Tisches bis zur Unterseite des Pendelkörpers gemessen. (eigene Darstellung)

3.4 Mögliche Ergebnisse und ihre Dokumentation

3.4.1 Ergebnisse und Diskussionen zum Vorversuch

Um einen Wagen mit der Masse $m = 1,20 \text{ kg}$ auf einer schiefen Ebene mit dem Winkel von beispielsweise 25° relativ zur Horizontalen um eine Höhe von $\Delta h = 0,5 \text{ m}$ hinaufzuziehen, wird eine Kraft von $F = 5,0 \text{ N}$ benötigt. Für einen zurückgelegten Weg von $s = 1,18 \text{ m}$ ergibt sich eine Hubarbeit von $W_{\text{hub}} = 5,9 \text{ J}$. Für andere Anstellwinkel ergibt sich stets die gleiche Hubarbeit (vgl. Tab. 1). Die gleiche Arbeit muss auch geleistet werden, wenn der Wagen mit einer Kraft von $F = 11,8 \text{ N}$ lotrecht um die gleiche Höhendifferenz nach oben gehoben wird.

Tabelle 1: Ergebnisse aus dem Vorversuch zu den Messungen an der schiefen Ebene (eigene Berechnung)

Anstellwinkel φ ($^\circ$)	Kraft entlang Ebene (N)	Weg entlang Ebene (m)	Arbeit (J)
25	5,0	1,18	5,9
45	8,4	0,70	5,9
65	10,7	0,55	5,9

Die Ergebnisse aus dem Vorversuch zeigen, dass keine Arbeit „gespart“ werden kann, da die Reduktion der Kraft mit einer Verlängerung des Weges einhergeht. Das Produkt aus Kraft und Weg bleibt gleich. Aufgrund der hier vernachlässigbaren geringen Rollreibung spielt es für die Hubarbeit keine Rolle, auf welchem Weg ein Körper um eine bestimmte Höhe angehoben wurde. Die gleiche Arbeit führt zur gleichen potentiellen Energie. Dadurch wird plausibel, dass die aufgewendete Arbeit vollständig in der potentiellen Energie gespeichert wird und damit erhalten bleibt.

3.4.2 Ergebnisse und Diskussionen zum Experiment

Die Messdaten aus dem Pendelaufbau erlauben die Berechnung des Mittelwerts \bar{t} zu der Verdunklungsdauer t der jeweiligen Auslenkung. Zusammen mit der Masse (hier $m = 243,98$ g) und dem Durchmesser (hier $d = 35,00$ mm) des zylindrischen Pendelkörpers können die potentielle und kinetische Energie berechnet werden. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Zeitmessung und Bestimmung des Höhenunterschieds liefern zwei signifikante Ziffern. Somit sind die kinetische und potentielle Energie auf zwei signifikante Ziffern anzugeben (Stiller, Allmers et al., eingereicht).

Tabelle 2: Ergebnisse aus dem Schülerexperiment zur Energieerhaltung am Fadenpendel (eigene Berechnung)

Höhendifferenz h (mm)	Verdunklungsdauer \bar{t} (ms)	Geschwindigkeit v (m/s)	potentielle Energie E_{pot} (J)	kinetische Energie E_{kin} (J)
44	39	0,90	0,11	0,10
63	34	1,0	0,15	0,13
83	29	1,2	0,20	0,18
103	26	1,3	0,25	0,22
123	23	1,5	0,29	0,28
143	22	1,6	0,34	0,31
163	20	1,8	0,39	0,37
183	19	1,8	0,44	0,41

Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit der kinetischen Energie von der potentiellen Energie. Die durchgezogene Linie stellt die Ausgleichsgerade dar. Ihre Lage wurde über den Datenschwerpunkt und über den Koordinatenursprung festgelegt. Der Durchgang durch den Koordinatenursprung ergibt sich aus dem Sachzusammenhang, da ein nicht ausgelenktes Pendel auch nicht schwingt. Die unterbrochene Gerade stellt den zu erwartenden theoretischen Verlauf bei vollständiger Umwandlung von potentieller in kinetische Energie dar.

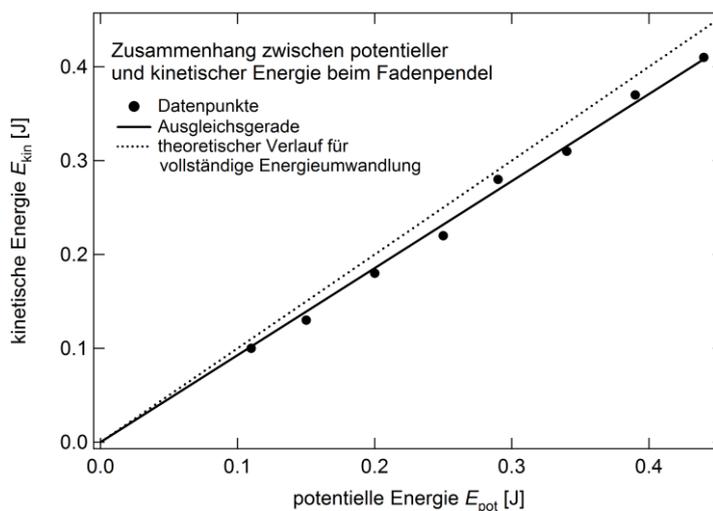


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen potentieller und kinetischer Energie (eigene Darstellung)

Im Vergleich zu dem theoretischen Verlauf ist die kinetische Energie immer geringer als die potentielle Energie. Mit größer werdender potentieller Energie nimmt dabei die Abweichung vom Erwartungswert zu. Dies lässt sich durch die Energieentwertung von mechanischer in thermische Energie durch Reibung verstehen. Diese Verluste an mechanischer Energie nehmen mit größerer Auslenkung zu, da sich zum einen der Weg des Fadens an der Aufhängung verlängert und zum anderen die Geschwindigkeit des Pendelkörpers erhöht, wodurch in beiden Fällen die Reibung zunimmt. Die Abweichung der kinetischen Energie vom Erwartungswert für den Durchgang mit der größten Höhendifferenz (und damit mit der größten Reibung) beträgt 0,03 J, was einer relativen Abweichung von etwa sieben Prozent vom Erwartungswert entspricht.

Aus den Ergebnissen des Experiments kann geschlossen werden, dass nur ein geringer Teil der potentiellen Energie nicht in kinetische Energie umgewandelt wird. Durch die Extrapolation der Ausgleichsgeraden durch den Koordinatenursprung zeigt sich, dass dieser Anteil mit geringer werdender Reibung ebenfalls verschwindet. Es kann daher gefolgert werden, dass die potentielle Energie, die nicht in kinetische umgewandelt wurde, zur Erwärmung der Umgebung geführt hat. Die Hypothese „Die potentielle Energie wird bei vernachlässigbaren Verlusten durch Reibung vollständig in kinetische Energie umgewandelt. Reibungsverluste führen zu einem Verlust an kinetischer Energie“ kann daher angenommen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde in die Begriffe „Arbeit“ und „Energie“ sowie in die Erhaltung der Energie eingeführt. Über die Reflexion der Durchführung und Auswertung des Experiments wird die Energie als eine abstrakte Größe erfahrbar gemacht, die sich durch das Ablaufen eines Prozesses bemerkbar und quantifizierbar macht. Eine empirische Überprüfung des Energieerhaltungssatzes wird am Beispiel des Fadenpendels vorgestellt. Ferner wurde der Erhaltungssatz angewendet, um die vollständige Umwandlung von potentieller in kinetische Energie zu modellieren. Störende Einflüsse durch Reibung konnten identifiziert und bis zu einem gewissen Grad minimiert werden. Das Konzept von der Energieerhaltung und die Umwandlung von einer Energieform in eine andere Energieform sind für die Deutung verschiedener experimenteller Befunde notwendig, sodass an die in diesem unterrichtspraktischen Beitrag erworbenen Kompetenzen angeknüpft werden kann (Stiller et al., S. 5–16 in diesem Heft; Stiller, Allmers et al., eingereicht).

Literatur und Internetquellen

- Bader, F., & Dorn, F. (1991). *Dorn-Bader, Physik Mittelstufe*. Hannover: Schroedel.
- Demtröder, W (1998). *Experimentalphysik 1*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08598-1>
- Feynman, R. (1996). *Vom Wesen physikalischer Gesetze*. München: Piper.
- Feynman, R. (2011). *The Feynman Lectures on Physics, Bd. I*. New York: Basic Books.
- Grehn, J., & Krause, J. (Hrsg.). (2007). *Metzler Physik*. Braunschweig: Schroedel.
- Haber-Schaim, U., Dodge, J.H., Gardner, R., & Shore, E.A. (1991). *PSSC Physics*. Dubuque, IA: Kendall/Hunt Publishing Company.
- KMK (Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland) (2004). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Beschluss vom 16.12.2004. Zugriff am 06.05.2019. Verfügbar unter: http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf.
- Kuhn, W. (Hrsg.). (2003). *Kuhn Physik, Bd. 2*. Braunschweig: Westermann.

- Schlichting, H. (2000). Energieentwertung – ein qualitativer Zugang zur Irreversibilität. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik*, 49 (2), 2–6.
- Smith, G. (2008). Newton's *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. In E.N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2008 Edition). Zugriff am 01.02.2020. Verfügbar unter: <https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/>.
- Stiller, C., Allmers, T., Stockey, A., & Wilde, M. (eingereicht). „Data-Literacy“ – Grundbildung im Umgang mit empirischen Daten. *MNU – Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*.
- Stiller, C., Hahn, S., Stockey, A., & Wilde, M. (2020). Experimentierend zu mehr Selbstbestimmung: Der *Basiskurs Naturwissenschaften* – Theoretische Leitlinien und empirische Hinweise. *PFLB – PraxisForschungLehrer*innenBildung*, 2 (2), 5–16. <https://doi.org/10.4119/pflb-3300>
- Stiller, C., Stockey, A., Hahn, S., & Wilde, M. (eingereicht). Das Konzept des fächerübergreifenden „Basiskurs Naturwissenschaften“ und seine didaktisch-methodischen Prinzipien. *MNU – Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*.
- Sweller, J., van Merriënboer, J.J.G., & Paas, F.G.W.C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10 (3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>

Beitragsinformationen

Zitationshinweis:

Allmers, T., & Wilde, M. (2020). Energie und Energieerhaltung am Beispiel des Fadenpendels. *PFLB – PraxisForschungLehrer*innenBildung*, 2 (2), 40–52. <https://doi.org/10.4119/pflb-3303>

Online-Supplement:

Materialien für das Experiment: Energieerhaltung am Beispiel des Fadenpendels

Online verfügbar: 19.02.2020

ISSN: 2629-5628



© Die Autor*innen 2020. Dieser Artikel ist freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 4.0 Deutschland (CC BY-SA 4.0 de).

URL: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/de/legalcode>