

Susanne Weißnigk

Energieerhaltung und -entwertung

Ein wichtiges, aber schwieriges Thema
in Naturwissenschaft und Gesellschaft

Die naturwissenschaftliche Größe Energie erfüllt universelle Gesetze und begründet damit eines der bedeutendsten Erklärungsmodelle für naturwissenschaftliche Phänomene und den Ablauf naturwissenschaftlicher Prozesse. Wissen über Energie ist für die Lösung vieler gesellschaftlicher Probleme notwendig. Schon allein das Nachvollziehen einiger, auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen basierender Entscheidungen wie etwa der zur sog. Energiewende erfordert eine gewisse Kenntnis des naturwissenschaftlichen Energiekonzepts. Aufgrund der exponierten Stellung des Energiethemas in den Naturwissenschaften wurde Energie als Basiskonzept in den Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss in den naturwissenschaftlichen Fächern ausgewiesen.

In der Fachdidaktik besteht Einigkeit darüber, dass eine umfassende Auseinandersetzung mit dem Thema Energie eine Betrachtung der Aspekte

- Energieformen,
- Energieumwandlung und -transfer,
- Energieentwertung und Energieerhaltung

erfordert ([1], [2]). Während die Entwicklung eines Verständnisses von Energieformen und -umwandlungen Lernenden nicht besonders schwerfällt [3], erweist sich die Entwicklung eines Verständnisses von Energieentwertung und -erhaltung als schwieriger ([3]; s. a. **Kasten 1**). Doch gerade das Wechselspiel von Entwertung und Erhaltung

trägt zum Verständnis von Energietransferprozessen und ihrer Quantifizierung bei. Dieses wiederum ermöglicht erst die Übertragung des Energiekonzepts auf Alltagsphänomene.

Ein Verständnis der beiden Aspekte Entwertung und Erhaltung erfordert eine intensive unterrichtliche Auseinandersetzung, und es „besteht [...] Handlungsbedarf darin, erfahrungsbasiertes Lernen, also Lernen aus Experimenten, Projekten oder allgemein schüleraktivierende Lernformen, zu vertiefen“ [4]. Diesem Wunsch möchte das vorliegende Heft Rechnung tragen.

Energie in den Naturwissenschaften

Energie ist eines der zentralen Konzepte in den Naturwissenschaften und hat innerhalb jeder naturwissenschaftlichen Disziplin eine grundlegende Bedeutung ([5]–[7]). Damit ist Energie ein naturwissenschaftliches Querschnittskonzept und verknüpfendes Element zwischen Chemie, Biologie, Physik. Jedes der drei naturwissenschaftlichen Fächer trägt mit seinen fachspezifischen Inhalten zur Entwicklung eines elaborierten Verständnisses von Energie bei.

Für alle Fächer gilt: Energie selbst kann nicht direkt beobachtet werden. Erst Angaben wie Energie pro Zeit

Der Dreiklang Energieerhaltung – Energieentwertung – Entropie

Energieerhaltung

Das wichtigste Charakteristikum von Energie ist, dass sie weder vernichtet noch produziert werden kann – Energie bleibt erhalten, ist also eine Erhaltungsgröße [13]. Die Gesamtenergie ändert sich in einem abgeschlossenen System nicht, auch wenn innerhalb des Systems Umwandlungsprozesse stattfinden und Energie transferiert wird. Die Größe ändert sich nur, wenn Energie aus dem System abgeführt oder dem System zugeführt wird.

Während Energie als mathematisches Prinzip eine gewisse Abstraktheit besitzt, erscheint der Energieerhaltungssatz einfach und schnell rezipierbar. Hierbei ist jedoch Vorsicht geboten: Ein differenziertes Verständnis des Energiekonzepts wird nicht dadurch erreicht, dass scheinbar einfache Rechnungen mithilfe der Energie als Bilanzierungsgröße durchgeführt werden – wie etwa die Berechnung der Geschwindigkeit der Kugel eines Fadenpendels im Nulldurchgang durch die gegebene Ausgangshöhe. In den naturwissenschaftlichen Unterricht gehören zusätzliche Argumente, um die Behandlung des Energiekonzepts plausibel zu machen und um den Umgang mit Energie als Bilanzierungsgröße sorgfältig einzuführen.

Energieentwertung

Am Beispiel des Fadenpendels können sowohl Energieumwandlungsprozesse thematisiert werden, als auch die Energieentwertung über das intuitive Verständnis, dass die Bewegung des Pendels irgendwann aufhört. Damit bietet sich die Möglichkeit, die Irreversibilität des Prozesses anzusprechen. Sogar eine Vernetzung dieser Gedanken mit der Thermodynamik ist möglich: Die in der Natur ablaufenden Prozesse werden in den Hauptsätzen der Thermodynamik erfasst. Das Prinzip der Energieerhaltung entspricht dem ersten Hauptsatz.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik macht eine Aussage über die Richtung der Energieübertragung: Wärme geht niemals von selbst von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur über. Die Irreversibilität jedes realen Prozesses bzw. die damit verbundene Vergrößerung der Entropie findet sich im zweiten Hauptsatz wieder.

Entropie

Das Konzept der Entropie wurde bei der phänomenologischen Betrachtung von Schmelzvorgängen von Clausius eingeführt. Er legte fest, dass bei der Übertragung von Wärme auch noch eine andere mengenartige Größe übertragen wird – die Entropie. Dabei ist die Entropieänderung eines Systems abhängig von der zugeführten Wärmemenge bei einer bestimmten Temperatur.

Einige Jahre später kam mit Boltzmann die statistische Definition der Entropie hinzu, mit der die Irreversibilität von realen Vorgängen abgebildet wird. Sie wird gemeinhin als Maß für

die „Unordnung“ in einem System verwendet. Die umgangssprachliche Ausdrucksweise soll die statistische Definition von Entropie erfassen:

- *Die Entropie ist proportional zum Logarithmus der Anzahl von Mikrozuständen in einem System.*

Dabei beschreiben die Mikrozustände alle Möglichkeiten, wie sich die betrachteten Atome oder Moleküle anordnen können. Ein alltägliches Beispiel zur Anschauung ist ein offenes Parfümfläschchen: Der Duft des Parfüms verteilt sich mit der Zeit im Raum und konzentriert sich nicht wieder im Fläschchen. Die Entropie hat mit der Anzahl der Mikrozustände zugenommen.

Neben dem Erhaltungssatz für Energie gilt ein eingeschränkter Erhaltungssatz für Entropie: In einem abgeschlossenen System kann die Entropie nicht abnehmen, jedoch erzeugt werden. Im abgeschlossenen System gilt die Erhaltung für reversible Prozesse, bei irreversiblen Prozessen nimmt die Entropie zu. Damit ist die Entropie immer größer oder gleich Null.

Ein Beispiel für irreversible Prozesse sind mechanische Vorgänge, bei denen mechanische Energie durch Reibung in thermische Energie umgewandelt wird. Da ein solcher Prozess nicht ohne Zufuhr von Energie umgekehrt werden kann, spricht man auch von Energieentwertung. Irreversibel erzeugte Entropie kann nicht vernichtet werden. Bei jedem realen Vorgang wird ein Teil der Energie in eine weniger nutzbare Energieform – nämlich thermische Energie – umgewandelt, gleichzeitig nimmt die Entropie durch die Umwandlung der Energie in thermische Energie zu. Damit gelingt es mithilfe der Entropie, die unterschiedliche Wertigkeit von Energie zu berücksichtigen bzw. ein Maß für die Nutzbarkeit von Energie aufzustellen. Die Energieentwertung wird daher aus fachlicher Sicht mithilfe des Entropiebegriffs beschrieben (vgl. dazu z. B. [21]).

Energie- und Entropiebetrachtung von Prozessen

Zusammengefasst kann der erste Hauptsatz für Bilanzierungen verwendet werden, die Richtung eines ablaufenden Prozesses wird durch den zweiten Hauptsatz gegeben. Neben der Richtung ist für die Analyse thermodynamischer Prozess auch die Unterscheidung von

- *Prozessgrößen* (Wärme und Arbeit) und
- *Zustandsgrößen* (Entropie und thermische Energie)

notwendig. Im Rahmen von Energieerhaltung und Energieentwertung beschäftigt man sich automatisch auch mit dem Konzept der Entropie. Oder: „Zur physikalischen Beschreibung der lebensweltlichen Energie sind zwei komplementäre physikalische Konzepte notwendig: Energie und Entropie. Die Energie beschreibt den Erhaltungsaspekt, die Entropie den Verbrauchs- und Antriebsaspekt.“ ([22], S. 7)

bei dissipativen Prozessen oder die in einer Zeitspanne umgesetzte Energie – also die Leistung – machen den Energiebegriff implizit fassbar.

Auch für die Beurteilung der Möglichkeit von Prozessen spielt die Betrachtung von Energie eine wichtige Rolle. Verletzungen des Energieerhaltungssatzes sind z. B. bei der Vorhersage der Existenz von Teilchen ein entscheidendes Argument. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Vorhersage des Neutrinos durch Wolfgang Pauli.

Energie als abstraktes Konzept

Als wichtige Person, die sich mit didaktischen Fragen des Energiebegriffs befasst hat, gilt Richard Feynman. Feynman ging es dabei nicht nur darum, den Energieerhaltungssatz begreifbar zu machen, sondern das Energiekonzept in sinnvollen Zusammenhängen zu behandeln.

Zum Beispiel äußerte er als Mitglied der Staatlichen Lehrplankommission Kaliforniens Bedenken bei der Neueinführung eines Schulbuchs. In diesem wurde die Frage gestellt, wodurch die Bewegung eines Aufziehautos zustande käme. Die vom Buch vorgeschlagene Antwort „Die Bewegung kommt durch Energie zustande“ lehnte Feynman mit dem Vorschlag ab, doch zunächst die Mechanik des Spielzeugautos zu thematisieren – die Aufziehfeder, die durch eine Person aufgezogen wurde, die wiederum dieses Aufziehen bewältigen kann, weil sie Nahrung zu sich genommen hat und diese Nahrung mithilfe der Sonne heranwachsen konnte.

Feynman ging es darum, Energie in ihrer ganzen Abstraktheit begreifbar zu machen: Er wehrte sich insbesondere gegen die naive Verwendung von Energie als Generalantwort auf die Frage nach der Ursache von Bewegungen. Feynman wandte ein, dass etwa das Stehenbleiben des Spielzeugauto ebenso mit Energie begründet werden könne: Die Energie des Autos wird durch die vorhandene Reibung kontinuierlich entwertet und als thermische Energie an die Umgebung abgegeben. So bleibt nach Feynman Energie in dem kritisierten Schulbuch (und auch in vielen modernen Materialien) „ein inhaltsleeres Wort“. Doch „[e]ine Worthülse [kann] nicht zur Verständniserweiterung beitragen“ ([8], S. 394). Im Zusammenhang mit Bewegungen betonte Feynman, dass es um die Umwandlung in eine weniger nutzbare Energieform geht – die Energie nimmt weder zu noch ab, sie ändert einfach ihre Form und „wenn etwas stehenbleibt, verwandelt sich die Energie in Wärme, in allgemeine Unordnung“ ([8], S. 394).

Laut Feynman ist es insbesondere wichtig zu erkennen, dass Energie nur die Buchhalterin, aber nicht die Akteurin im Geschehen ist.

Energie in der Gesellschaft

Über die Naturwissenschaften hinaus ist Energie ein interdisziplinäres Querschnittskonzept, das den gesellschaftlichen, wissenschaftlichen und technologischen Bereich verbindet. Energie wird zur Beschreibung vieler gesell-

schaftlicher und technologischer dynamischer Prozesse herangezogen und weist damit einen hohen Bezug zur Lebenswelt auf.

Insbesondere das Thema Energieversorgung und der schonende Umgang mit Ressourcen sind gesellschaftlich von großer Bedeutung. Ein Blick in die Lehrplangvorgaben der einzelnen Länder zeigt allerdings eine gewisse Beliebigkeit bei der Betrachtung von Energie in außernaturwissenschaftlichen Kontexten [9]. Jedoch wird die übergeordnete Bedeutung des Themas Energie zunehmend durch fächerübergreifende Projekte im Kontext von „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ aufgegriffen. Gerade in diesem Zusammenhang kann es sich lohnen, die „Energiebrille“ aufzusetzen. Da Lernende die Energiesichtweise nicht ohne Weiteres von selbst einnehmen, ist eine Ermunterung dazu vonseiten der Lehrkraft erfahrungsgemäß notwendig.

Unterricht zum Thema Energie

Energieerhaltung oder Energieentwertung – was sollte in der Schule zuerst eingeführt werden, um das Verständnis des Energiebegriffs am besten zu unterstützen? Letztlich erinnert die Frage an das Henne-Ei-Problem. Das eine Konzept ist ohne das andere nicht denkbar, beide bilden jeweils eine Seite der Medaille. Dabei geht es auch nicht um die Bedeutung der Energieerhaltung, die als übergreifendes Prinzip außer Frage steht, sondern darum, auf welche Weise ein elaboriertes Verständnis von Energie am besten entwickelt werden kann.

Einige Schulbücher schlagen einen Lehrgang vor, bei dem Energieerhaltung als Ausgangspunkt für die Betrachtung von Energieentwertung steht ([10]–[12]). Bei diesem Weg dient in Anlehnung an die verbreitete feynmansche Metapher von „Dennis the Menace“ (einem wilden, Unordnung produzierenden Kind in einer amerikanischen Comicserie; vgl. [13] und <https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/ausblick/feynman-zum-energiebegriff>) die Energieerhaltung als „Suchprogramm“ für Energieformen. Ein Verständnis von Energieentwertung wird dabei ausgehend von der Energieerhaltung entwickelt. Fachdidaktische Studien lassen jedoch auch einen anderen Weg als fruchtbar erscheinen, der über folgende Etappen verläuft (vgl. [3] und den Artikel von Neumann auf S. 7–9):

- Energieformen und -quellen,
- Energieumwandlung und -transfer,
- Energieentwertung und
- Energieerhaltung.

Modelle, Visualisierungen und Abstraktion

Zur Unterstützung des Verständnisses von Energieerhaltung existieren unterschiedliche Modelle für die Darstellung der Energieformen zu verschiedenen Zeitpunkten eines Prozesses, z. B.

- das *Würfelmodell* (vgl. den Artikel von Hadinek et al. auf S. 20–23),

- das *Kontomodell* oder *Energieflussdiagramme* (vgl. den Artikel von Friege et al. auf S. 33–38).

Ein für die Schule gänzlich neuer Zugang ist der *System-Transfer-Ansatz* (vgl. den Artikel von Kubsch et al. auf S. 24–27). Dabei liegt der Fokus auf den Energietransfers zwischen den beteiligten Systemen, wodurch die Prozesse stärker in den Mittelpunkt rücken. Im Zusammenhang mit der Energieentwertung ist auch die *Sichtbarmachung thermischer Energie* hilfreich (vgl. den Artikel von Weißnigk und Nordine auf S. 18–19).

Je nach Klassenstufe muss die Behandlung des Themas Energie auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus stattfinden. Während in den Jahrgängen 5 und 6 eher phänomenologisch gearbeitet wird (vgl. den Artikel von Detken und Brückmann auf S. 10–17), ist eine mathematische Betrachtung von Prozessen im Sinne einer Bilanzierungs-idee in höheren Jahrgängen möglich (vgl. den Artikel von Ludemann und Kraus auf S. 39–43).

Schwierigkeiten beim Verständnis von Energieentwertung und Energieerhaltung

Lernende haben Schwierigkeiten beim Entwickeln eines Verständnisses der Aspekte Energieentwertung und insbesondere Erhaltung (vgl. [3], [15]–[17]). Viele Schülerinnen und Schüler können den Energieerhaltungssatz zwar rezitieren, verfügen aber nicht über ein tieferes Verständnis [18]. Auch ein Transfer auf Alltagsphänomene erweist sich häufig als schwierig [19]. Unser intuitives Energieverständnis auf der Basis von Alltagserfahrungen – z. B. „Licht ausmachen, um Energie zu sparen“ – steht in Widerspruch zum in der Schule vermittelten Energieerhaltungssatz: Warum hat die Welt überhaupt ein Energieproblem, wenn doch die Energie erhalten bleibt? Hier wird deutlich, dass Lernende für ein umfassendes Verständnis der Energieerhaltung auch ein Verständnis von Energieentwertung benötigen [2]. Viele Lernende sind sich der Bedeutung der Energieentwertung jedoch nicht bewusst [20].

Die zeitliche Verzahnung der Aspekte Energieerhaltung und -entwertung beim Lernen über Energie wurde bereits 1979 vorgeschlagen [21]: Hier werden Erhaltung und Entwertung „als komplementäre Aspekte ein und derselben Klasse von Erfahrungen“ ([21], S. 15) betrachtet. Zudem soll der Fokus bei Alltagsphänomenen auf den Energiestrom in die Umgebung Lernende beim Verständnis von Entwertung, aber auch von Erhaltung unterstützen [15]. Dabei können sie erkennen, dass die Energie nicht verschwindet, sondern als thermische Energie an die Umgebung abgegeben wird [15]. Allerdings sollte in diesem Zusammenhang an das Konzept des Energietransfers angeknüpft werden, da dies für Lernende leichter verständlich ist sowie die Aspekte Entwertung und Erhaltung miteinander verknüpft [2].

Eine weitere Schwierigkeit ist damit verbunden, dass sich der Energieerhaltungssatz auf abgeschlossene Systeme bezieht. Die meisten realen Systeme sind jedoch

gerade nicht abgeschlossen, sodass Energie hinein- und herausfließen werden kann. So einfach es scheint, den Erhaltungssatz für ein abgeschlossenes System zu nennen, so schwer ist es, ein reales abgeschlossenes System zu finden, den Bilanzierungsgedanken aufzunehmen und mit Energiemengen zu rechnen.

Insgesamt ist Energie eines der wichtigsten Konzepte, das uns in unserem Leben begleitet. In den Naturwissenschaften ist der Energieerhaltungssatz ein entscheidendes Werkzeug, etwa als heuristisches Prinzip zur Problemlösung bei Bilanzierungsproblemen (z. B. bei der Vorhersage des Neutrinos). Für das Erlangen eines elaborierten Verständnisses von Energie ist es jedoch notwendig, Erhaltung und Entwertung als komplementäre Aspekte zu betrachten.

Literatur

- [1] Duit, R.: Der Energiebegriff im Physikunterricht. Kiel: IPN, 1986.
- [2] Duit, R.: Teaching and Learning the Physics Energy Concept. 2012. – <http://www.geier.us/esummit-msu.net/content/teaching-and-learning-physics-energy-concept>
- [3] Neumann, K.; Viering, T.; Fischer, H.: Die Entwicklung physikalischer Kompetenz am Beispiel des Energiekonzepts. In: ZIDN 26 (2010), S. 285–298.
- [4] Euler, M.: Energie ist ein Motor unserer Gesellschaft. 2012. – <http://rwe.com/blogs/rwestiftung/2012/03/30/%E2%80%9Eenergie-ist-ein-motor-unserer-gesellschaft%E2%80%9C/> [29.09.2017].
- [5] KMK (Hrsg.): Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10): Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004. München: Luchterhand, 2005.
- [6] KMK (Hrsg.): Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10): Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004. München, Luchterhand, 2005.
- [7] KMK (Hrsg.): Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10): Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004. München: Luchterhand, 2005.
- [8] Feynman, R.: Sie belieben wohl zu scherzen, Mr. Feynman. München/Zürich: Piper, 1985.
- [9] Euler, M.: Energiebildung als Herausforderung und Chance. 2011. – <https://www.lehrer-online.de/artikel/ta/energiebildung-an-schulen-aus-der-sicht-von-lehrkraeften/> [29.09.2017].
- [10] Bredthauer, W.; Bruns, K. et al.: Impulse Physik 7/8. Stuttgart: Ernst Klett Verlag, 2008.
- [11] Appel, T.; Heß, D. et al.: Spektrum Physik. Niedersachsen 7/8. Braunschweig: westermann druck, 2015.
- [12] Oberholz, W.; Blaß, D. et al.: Physik Dorn Bader. 7/8 Gymnasium Niedersachsen. Braunschweig: westermann druck, 2015.
- [13] Feynman, R. P.: Feynman lectures on physics. Boston (MA): Addison Wesley Longman, 1970.
- [14] Xie, C.: Visualizing Chemistry With Infrared Imaging. In: Journal of Chemical Education 88 (2011), S. 881–885.
- [15] Millar, R.: Towards a Research-Informed Teaching Sequence for Energy. In: Chen, R. F. et al. (Eds.): Teaching and Learning of Energy. Cham (Schweiz): Springer, 2014, S. 187–201.
- [16] Chabalengula, V. M.; Sanders, M.; Mumba, F.: Diagnosing students' understanding of energy and its related concepts in biological context. In: International Journal of Science and Mathematics Education 10 (2012), Nr. 2, S. 241–266.
- [17] Driver, R.; Warrington, L.: Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. In: Physics Education 20 (1985), Nr. 4, S. 171–176. – <https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/4/308>
- [18] Fehlow, F.: Weiterentwicklung und Evaluation eines Lehrgangs zur Energieentwertung unter dem Einsatz des Messinstruments Sensor Tag. Hannover: Leibniz Universität, 2016 (unveröffentlichte Masterarbeit).
- [19] Nordine, J.: Teaching Energy across the Sciences – K-12. Arlington (VA): NSTA press, 2016.
- [20] Trumper, R.: A longitudinal study of physics students' conceptions of energy in pre-service training for high school teachers. In: Journal of Science Education and Technology 7 (1998), Nr. 4, S. 311–317.
- [21] Schlichting, H. J.; Backhaus, U.: Energieentwertung und der Antrieb von Vorgängen. In: NiU Physik/Chemie (1987), Nr. 35, S. 15–20.
- [22] Schlichting, H. J.: Von der Energieentwertung zur Entropie. In: PdN Physik 49 (2000), Nr. 2, S. 7–11.

Energieentwertung elementarisieren

Vier Wege zum Verständnis von Energieentwertung und Entropie

Duit [1] nennt die Energieentwertung als einen von vier zentralen Aspekten für das Verständnis der Energie. Um Energieentwertung zu beschreiben, gibt es im Wesentlichen vier verschiedene Ansatzpunkte.

1. Energieentwertung hat zu tun mit der eingeschränkten Umwandelbarkeit von Energieformen

„Es gibt sogenannte wertvolle und weniger wertvolle Energieformen. Zu den wertvollen zählen die kinetische Energie, die potentielle Energie oder die elektrische Energie. Sie alle lassen sich vollständig in alle anderen Energieformen umwandeln. Dies gilt nicht für die innere Energie, jedenfalls nicht für den Teil, welcher der thermischen Bewegung der kleinsten Teilchen zuzuordnen ist. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist der Verwendungswert, d. h., desto größer ist der Anteil der inneren Energie, der vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Bei allen Prozessen, die in der Realität ablaufen, nimmt also der [...] Gebrauchswert der Energie ab.“ ([1], S. 5)

Die Vereinfachung liegt bei diesem Ansatz darin, dass der unterschiedliche Gebrauchswert den Energieformen zugeordnet wird. Dabei wird vernachlässigt, dass thermische Energie durchaus (wenn auch nicht zu 100 %) in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Die Nutzbarkeit thermischer Energie hängt zudem nicht allein an der Energieform, sondern wird von den Temperaturverhältnissen bestimmt.

2. Energieentwertung hat zu tun mit der Irreversibilität von Prozessen

Ein anderer Ansatz (s. z. B. [2], S. 188) nutzt die Unterscheidung von reversiblen und irreversiblen Prozessen.

Prozesse, die in der Realität nur in einer Richtung ablaufen, zeichnen sich dadurch aus, dass thermische Energie an die Umgebung abgegeben wird. Dies kann als ein Indiz dafür gewertet werden, dass die auftretende Umgebungswärme offenbar weniger gut umwandelbar ist. Neben der Abnahme nutzbarer Energie wird bei diesem Ansatz auch die Idee betont, dass durch Energieentwertung eine zeitliche Richtung von Prozessen vorgegeben ist.

3. Energieentwertung ist eine Folge der Zunahme der Entropie

Im Science Slam „Entropie – Von Kühltürmen und der Unumkehrbarkeit der Dinge“ (<https://www.youtube.com/watch?v=z64PJwXy--8>) beschreibt Martin Buchholz Energieentwertung populärwissenschaftlich. Im Zentrum steht

die Idee, dass man sich Entropie als etwas vorstellen kann, das im Prozess strömt und nie weniger, sondern nur gleich bleiben oder mehr werden kann (s. a. [3]).

Dass mit ähnlichen Bildern auch in der Mittelstufe gearbeitet werden kann, zeigt der Karlsruher Physikkurs [4]. Entropie wird hier als zentrale Größe der Wärmelehre betrachtet und an die Alltagsvorstellung von Wärme angeknüpft. Dies ist zulässig, weil thermische Energie und Entropie immer gleichzeitig fließen. Der Alltagsbegriff lässt sich deshalb an thermische Energie oder an Entropie anknüpfen.

Entropie wird hier jeweils als Energieträger für thermische Energie verstanden. Die Vorstellung ist analog zu Ladungen, die als Energieträger für elektrische Energie angesehen werden können. Wie viel Energie die Ladungen tragen, bestimmt die Spannung. Und wie viel Energie die Entropie transportiert, bestimmt die Temperatur.

Eine Zunahme von Entropie bedeutet, dass thermische Energie an die Umgebung abgeführt wird. Bei reversiblen Prozessen ist die Entropie unverändert. Hier wird keine thermische Energie abgeführt. Damit ist der Zusammenhang zu Entwertungsvorstellungen unter 2. hergestellt: „Reale Prozesse sind irreversibel.“ ist gleichbedeutend mit „Bei realen Prozessen nimmt die Entropie zu.“

Mit der Entropie können Energieumwandlungen präziser beschrieben werden. Während die Energie nur die Buchhalterin im Geschehen ist, entscheidet die Entropie, in welche Richtung Prozesse ablaufen.

4. Energieentwertung bedeutet eine Abnahme der Exergie bzw. Zunahme der Anergie

In der Technik sind zusätzlich die Begriffe der Exergie und Anergie gebräuchlich. Exergie meint den Teil der Energie, der in Arbeit umgewandelt werden kann. Anergie ist der komplementäre Anteil.

Die Unterscheidung in Exergie und Anergie greift die Idee unter 1. auf und erweitert sie durch neue Begriffe und Quantifizierungen.

Literatur

- [1] Duit, R.: Energie: Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des naturwissenschaftlichen Unterrichts. In: NiU Physik 18 (2007), Nr. 101, S. 4–7.
- [2] Appel, T. et al.: Spektrum Physik 2. Gymnasium, Hessen. Hannover: Schroedel, 2012.
- [3] Buchholz, M.: Energie – wie verschwendet man etwas, das nicht weniger werden kann. Berlin/Heidelberg: Springer, 2016.
- [4] Herrmann, F.: Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I. Band 1: Energie – Impuls – Entropie. 2014. – http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/dl-counter/download/Sek_I_Band_1.pdf

Knut Neumann

Energieverständnis entwickeln

Physikdidaktische Erkenntnisse und Implikationen für die Unterrichtspraxis

Die zentrale Bedeutung der Energie in der Physik steht im Gegensatz zu den Schwierigkeiten, die Schülerinnen und Schüler mit dem Verständnis von Energie haben. Insbesondere der so wichtige Aspekt der Energieerhaltung bereitet den Schülerinnen und Schülern Probleme. Nur etwa ein Drittel aller Schülerinnen und Schüler erreicht zum Ende der Schulzeit ein Verständnis von Energie, das die Erhaltung der Energie einschließt. Dies überrascht nicht, wenn man bedenkt, dass das Prinzip der Energieerhaltung den Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler widerspricht. Warum bleibt das Fahrrad stehen, wenn man aufhört zu treten? Warum muss das Handy regelmäßig wieder aufgeladen werden? Warum, wenn nicht, weil Energie verbraucht wird? Dieser Beitrag fasst die Erkenntnisse der Fachdidaktik zur Entwicklung des Energieverständnisses zusammen und zeigt, welche Folgerungen sich daraus für den Physikunterricht ergeben.

Entwicklung des Energieverständnisses

Das Verständnis von Energie, das Schülerinnen und Schüler am Ende der Schulzeit erworben haben sollten, lässt sich wie folgt charakterisieren: ein Verständnis der Erhaltung inmitten des Wechsels von Erscheinungsformen und -orten bei gleichzeitiger Abnahme der Nutzbarkeit durch Entwertung [1]. Wie sich ein solches Verständnis entwickelt, wurde intensiv erforscht. Dabei zeigt sich zunächst, dass Schülerinnen und Schüler mit zahlreichen und vielfältigen Alltagsvorstellungen von Energie in die Schule kommen. Manche assoziieren Energie mit menschlicher Aktivität („Ich habe heute viel Energie!“), andere verstehen Energie als einen universellen Treibstoff („Ich lade mein Handy mit Solarenergie!“) [2].

Zudem erreichen Schülerinnen und Schüler im Unterricht scheinbar leicht ein Verständnis von Energieformen. Sie können Phänomenen oder Prozessen Energieformen zuordnen und einen Zusammenhang zwischen beobachtbaren Größen (z. B. der Dehnung eines Gummibands) und Energieformen (z. B. der Spannenergie) herstellen. Allerdings fällt es ihnen oft schwer, Phänomen und Energieform konzeptuell zu trennen: Bewegung ist eben nicht Energie, sondern in der Bewegung steckt Energie. Es folgt das Verständnis von Energieumwandlung und -übertragung. Die Lernenden erkennen, dass die Abnahme von Energie in einer Form oder an einem Ort immer mit der Zunahme von Energie in einer anderen Form oder an

einem anderen Ort einhergeht. Damit verknüpft ist die Erkenntnis, dass bei jedem (realen) Prozess immer auch ein Teil der Energie in thermische Energie der Umgebung umgewandelt wird und für eine weitere Nutzung nicht zur Verfügung steht (Energieentwertung). Am schwersten fällt es Schülerinnen und Schülern, wenn dies überhaupt gelingt, die Energieerhaltung zu verstehen [3]. Die Mehrheit der Schülerinnen und Schüler kann das Prinzip der Energieerhaltung am Ende der Schulzeit wiedergeben, es aber nicht zur Erklärung von Phänomenen oder zur Lösung von Problemen einsetzen (s. dazu das Beispiel im Beitrag von Ludemann und Kraus auf S. 39–43).

Energieverständnis entwickeln

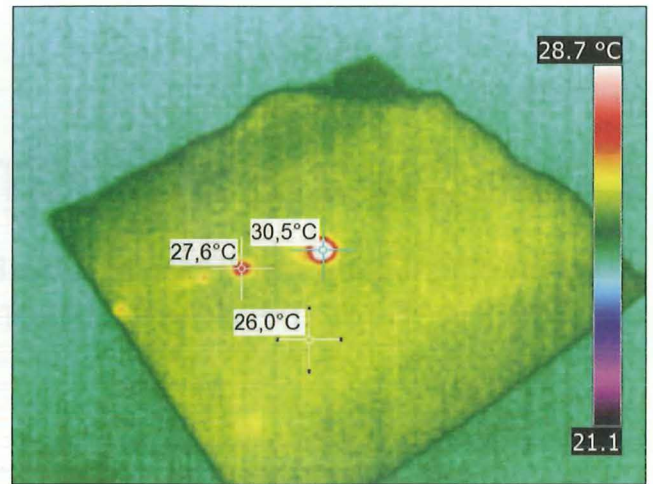
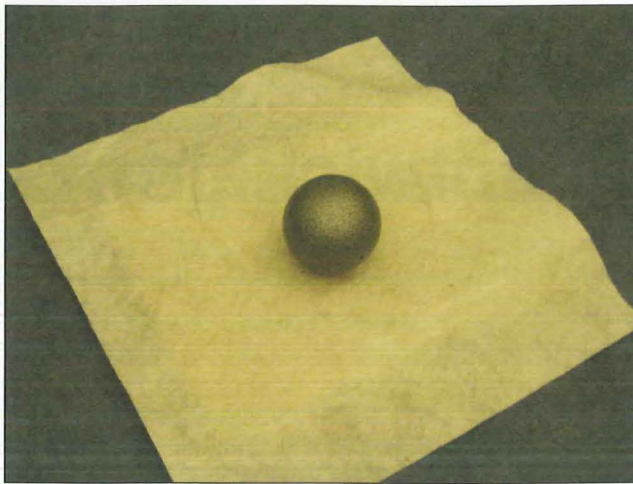
Die oben skizzierten Befunde legen nahe, das Energieverständnis im Unterricht ausgehend von den Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler nach und nach entlang der Schritte Energieformen, Energieumwandlung und -übertragung, Energieentwertung und Energieerhaltung zu entwickeln [4]. Wie dies aussehen könnte, wird im Folgenden skizziert.

Von Alltagsvorstellungen zu Formen

Die Einführung des Energiekonzepts im Physikunterricht ist gleich mit mehreren Herausforderungen verbunden. Die erste Herausforderung ist es, eine für Schülerinnen und Schüler angemessene und nachvollziehbare Antwort auf die Frage zu finden, was Energie eigentlich ist. Hier hat es sich bewährt, Energie als die Fähigkeit, Veränderungen hervorzurufen, einzuführen (z. B. als die Fähigkeit, ein Stück Knete zu verformen, s. [5]).

Die zweite Herausforderung stellen die Alltagsvorstellungen der Schülerinnen und Schüler dar, die sich als sehr beständig erwiesen haben. Hier ist es wichtig, dass die Schülerinnen und Schüler durch eine systematische Betrachtung der möglichen Formen von Energie lernen, Energie in ihrer physikalischen Bedeutung von ihrer Alltagsbedeutung abgrenzen. Dies ist nicht einfach – gerade auch weil die Liste der Energieformen nahezu beliebig erweiterbar ist und die einzelnen Formen nicht immer klar gegeneinander abgegrenzt sind. So werden z. B. oft auch Wind- oder Solarenergie als Energieformen geführt, obwohl Windenergie eigentlich Bewegungsenergie ist.

Die dritte Herausforderung besteht angesichts der Fülle der Energieformen darin, diese nicht zu „Etiketten“



Fotos: Jana Kröger

1 | Umwandlung von Bewegungsenergie in thermische Energie beim Auftreffen eines Steins auf dem Boden [7]

werden zu lassen, die einfach auf bestimmte Phänomene oder Prozesse „geklebt“ werden. Damit dies nicht passiert, sollte unbedingt erarbeitet werden, dass es immer von mehreren Faktoren abhängt, wie viel Energie einem Phänomen oder Prozess zugeschrieben wird; im Fall der Bewegungsenergie z. B. von der Masse und Geschwindigkeit eines Körpers. Entsprechende Faktoren lassen sich auch für andere Energieformen finden. Für Lageenergie die Masse und Höhe (über einem Bezugspunkt), für thermische Energie die Masse, das Material und die Temperatur [5]. Dabei sind nicht alle Faktoren von gleicher Qualität. So würde man einem Körper nur dann Bewegungsenergie zuschreiben, wenn er sich auch bewegt. Die Geschwindigkeit ist also ein Indikator für Bewegungsenergie, so wie die Höhe ein Indikator für Lageenergie und die Temperatur ein Indikator für thermische Energie ist. Diese Faktoren werden deshalb auch als Indikatoren bezeichnet. Auch wenn sich nicht für alle Energieformen in gleicher, einfacher Weise Faktoren und Indikatoren finden lassen, kann dieser Zugang die Schülerinnen und Schüler darin unterstützen zu erkennen, wie sich Energie in unterschiedlichen Formen manifestiert – insbesondere woran eine bestimmte Energieform erkannt wird und wovon es abhängt, wie viel Energie in dieser Form vorliegt.

Von Formen zu Entwertung

Können die Schülerinnen und Schüler (Erscheinungs-)Formen der Energie anhand ihrer Indikatoren bzw. Faktoren identifizieren und quantifizieren – kann die Energieumwandlung eingeführt und an verschiedenen Beispielen aus der Physik (z. B. dem Pendel) und dem Alltag (z. B. dem Motor) vertieft werden. Dabei können auch weitere, neue Energieformen eingeführt werden.

Die Schwierigkeit besteht hier darin, über eine reine Beschreibung hinauszukommen. Die Mächtigkeit des Energiekonzepts liegt schließlich darin begründet, dass die Kenntnis, wie viel Energie umgewandelt (oder übertragen) werden kann, Rückschlüsse z. B. darüber erlaubt, wie schnell sich ein Körper nach der Energieumwandlung (oder -übertragung) bewegen kann oder wie warm ein Körper werden kann. Dies setzt jedoch die Erhaltung von Energie voraus, von der die Schülerinnen und Schüler

in dieser Phase noch gar nicht wissen. Deshalb folgt auf die Betrachtung verschiedener Energieumwandlungen üblicherweise die Einführung der Energieerhaltung als Postulat.

Forschungsergebnisse legen jedoch nahe, dass gerade diese Vorgehensweise den Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten bereitet. So können sie z. B. die Umwandlung von Lageenergie in Bewegungsenergie beim Fallen des Steins beschreiben. Liegt der Stein aber letztendlich auf dem Boden, sind sie auf die Frage nach dem Verbleib der Bewegungsenergie nur allzu gern bereit, das Prinzip der Energieerhaltung aufzugeben [6], weil sie nicht erkennen, was mit der Energie passiert ist.

Dem kann recht einfach mit einer Wärmebildkamera abgeholfen werden (s. dazu [7] und den Beitrag von Weßnigk und Nordine auf S. 18–19). Qualitativ hochwertige Wärmebildkameras sind heute als Zubehör zu Smartphones zu erschwinglichen Preisen erhältlich. Mit diesen kann gezeigt werden, dass sich beim Auftreffen des Steins auf dem Boden der Boden erwärmt – die Bewegungsenergie also in thermische Energie (des Bodens) umgewandelt wurde (s. Abb. 1). Mithilfe der Wärmebildkamera kann aber nicht nur gezeigt werden, dass die scheinbar verschwundene Energie gar nicht verschwunden ist, sondern in thermische Energie (der Umgebung) umgewandelt wurde. Es kann auch verdeutlicht werden, warum in diesem Zusammenhang von Energieentwertung gesprochen wird. Die Energie breitet sich immer weiter aus, was in einem – im Vergleich zur Umgebung – immer kleineren Temperaturunterschied resultiert. Die Energie entzieht sich einer weiteren Nutzung, ihr Nutzwert ist gesunken.

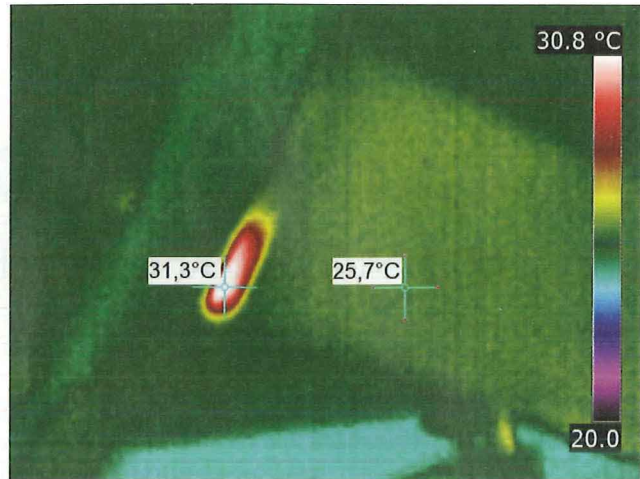
Von der Entwertung zur Erhaltung

Die Erkenntnis, dass bei jedem Umwandlungsprozess immer auch Energie in thermische Energie der Umgebung umgewandelt wird, die sich einer weiteren Nutzung entzieht, reicht für ein umfassendes Verständnis der Energie nicht aus (s. a. Beitrag von Wodzinski auf S. 6). Sie ermöglicht es aber, die Energieerhaltung mit den Schülerinnen und Schülern zu erarbeiten, statt sie nur zu postulieren.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass bei jedem Umwandlungsprozess Energie in thermische Energie der



Fotos: Jana Kröger



2 | Beispielexperiment zur Entwicklung der Energieerhaltung aus der Energieentwertung [7]

Umgebung umgewandelt wird, kann nämlich untersucht werden, wie viel Energie in thermische Energie umgewandelt wird. Dazu eignet sich z. B. ein Fahrrad-Rad, das mithilfe eines Kupferblocks abgebremst wird (s. Abb. 2). Das Abbremsen des Rades führt zu einer (messbaren) Erwärmung des Kupferblocks. Die Bewegungsenergie des Rades wird in thermische Energie der Kupferblocks (und des Reifens) umgewandelt. Je höher die Bewegungsenergie des Rades, desto höher die thermische Energie des Kupferblocks nach dem Abbremsen. Isoliert man das System nun schrittweise immer besser – z. B. indem man den Kupferblock zunächst auf einen Korkblock montiert und dann Seite für Seite mit Styropor isoliert –, bleibt immer mehr Energie im System. Die Frage, was passieren würde, wenn man das System perfekt isolieren könnte, führt dazu, dass die Schülerinnen und Schüler von selber das Prinzip der Energieerhaltung formulieren:

- „In einem abgeschlossenen System bleibt die Energie in der Summe erhalten.“

Damit auch dies nicht einfach nur ein Merksatz bleibt, sollte eine Diskussion der Bedingungen folgen, unter denen das Prinzip der Energieerhaltung gilt. Beispielsweise indem man thematisiert, dass sich auch das Fahrrad-Rad erwärmt und eigentlich als Teil des abgeschlossenen Systems berücksichtigt werden müsste.

Zusammenfassung und Ausblick

Forschungsergebnisse legen nahe, dass sich das Verständnis von Energie ausgehend von den Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler entlang der folgenden Schritte entwickelt:

- Energie kann sich in unterschiedlichen Formen und an unterschiedlichen Orten manifestieren.
- Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden oder von einem Ort an einen anderen übertragen werden,
- wobei immer auch Energie in thermische Energie der Umgebung umgewandelt wird, obwohl
- die Energie als solche erhalten bleibt.

Dies heißt nicht, dass die Erhaltung von Energie nicht zuvor thematisiert werden dürfte – genau genommen wird die Energieerhaltung bei der Betrachtung von Energieumwandlungen ebenso wie bei der Einführung von Energieformen implizit vorausgesetzt –, nur setzt das Verständnis der Energieerhaltung ein Verständnis von Energieformen, Energieumwandlungen und insbesondere eben der Umwandlung von Energie in thermische Energie der Umgebung und der damit verbundenen Abnahme des Nutzwerts voraus.

Zu berücksichtigen ist auch, dass die Entwicklung echten Verständnisses Zeit braucht und nicht in wenigen Wochen zu erreichen ist. Im Physikunterricht sollten zunächst ein Verständnis von Energieformen und erste Untersuchungen der Umwandlung und Übertragung von Energie angestrebt werden (z. B. bis zum Ende von Jahrgang 6). Darauf aufbauend kann ein Verständnis von Umwandlungs- und Entwertungsprozessen entwickelt werden (z. B. bis zum Ende von Jahrgang 8) und erst dann sollte die Erhaltung aus der Entwertung heraus entwickelt werden – auch, weil erst dann (d. h. am Ende von Jahrgang 9) die mathematischen Voraussetzungen für eine Quantifizierung der Energie in bestimmten Formen vorliegen (s. a. [5]).

Literatur

- [1] Duit, R.: Energie: Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des naturwissenschaftlichen Unterrichts. In: NiU Physk 18 (2007), Nr. 101, S. 4–7.
- [2] Solomon, J.: Learning about energy: how pupils think in two domains. In: International Journal of Science Education 5(1983), Nr. 1, S. 49–59.
- [3] Neumann, K. et al.: Towards a learning progression of energy. In: Journal of Research in Science Teaching 50 (2013), Nr. 2, S. 162–188.
- [4] Neumann, K.: Die Entwicklung physikalischer Kompetenz. Stand der Forschung und Desiderata. In: Plus Lucis 1 (2017), S. 35–39.
- [5] Hadinek, D.; Weßnig, S.; Neumann, K.: Neue Wege zur Energie – Physikunterricht im Kontext Energiewende. In: MNU 69 (2016), Nr. 5, S. 292–298.
- [6] Kesidou, S.; Duit, R.: Wärme, Energie, Irreversibilität. Schülervorstellungen im herkömmlichen Unterricht und im Karlsruher Ansatz. In: Physica Didactica 18 (1991), Nr. 2/3, S. 57–75.
- [7] Kröger, J.: Entwicklung von Experimenten zur Einführung der Energieentwertung und Energieerhaltung im Physikunterricht der Mittelstufe. Masterarbeit. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2012.