

6.3 Energieentwertung

Backhaus und Schlichting kritisierten bereits 1981 die randständige Behandlung der Entropie und damit der Energieentwertung im Vergleich zur Betonung der Energieerhaltung im Physikunterricht.²⁶ Angesichts der Energie- und Umweltkrise führe die einseitige Betonung der Erhaltung der Energie zu dem Eindruck, dass der Physikunterricht weltfremd sei. Die vermeintliche Schwierigkeit der Vermittlung des Entropiekonzepts sei darauf zurückzuführen, dass die Entropie als Zustandsgröße formal eingeführt werde, ohne dafür eine phänomenologische Basis durch Beobachtungen von Vorgängen zu schaffen. Zudem sei die Veranschaulichung der Entropie mithilfe von Ordnungsvorstellungen problematisch, weil für die Präzisierung von „Ordnung“ der Entropiebegriff selbst erforderlich sei.²⁷

Ausgehend von einer fachlich-fachdidaktischen Analyse haben Backhaus und Schlichting eine Unterrichtskonzeption entwickelt, die den 2. Hauptsatz in das Energiekonzept integriert.²⁸ Die Konzeption wird in „Energie und Energieentwertung – Arbeitsbuch für Schüler der Sekundarstufen I und II“²⁹ als konsistenter theoretischer Gedankengang entwickelt. Die folgende Darstellung orientiert sich am „Arbeitsbuch“. An einigen Stellen ist ergänzendes Material aus Zeitschriftenveröffentlichungen eingearbeitet.

■ Energie

Nach einer Einführung über die kulturelle Bedeutung der Verfügbarkeit von Energie wird im Arbeitsbuch die Energie als Grundgröße an Beispielen eingeführt: Systeme (die Sonne, eine Batterie etc.), die etwas bewirken können – leuchten, erwärmen, bewegen, verformen etc. –, besitzen etwas Gemeinsames: Energie. Die Energie wird in Energiearten unterteilt, die sich phänomenologisch oder über die Änderung physikalischer Größen als *Erscheinungsformen* zeigen. Es wird zwischen Übertragungs- und Speicherformen unterschieden. Die physikalische Größe Energie wird über eine Energiesprache anhand vieler Beispiele als Sprachspiel qualitativ entwickelt und anhand der elektrischen Energie quantifiziert.

■ Energieentwertung

Energieerhaltung und „Energieverbrauch“ werden in der Konzeption über den Begriff der Energieentwertung miteinander in Verbindung gebracht. Ausgangspunkt ist die Beobachtung von natürlichen Phänomenen, die mit evidenten Alltagserfahrungen zu der Schlussfolgerung führen, dass diese Phänomene von sich aus nur in eine Richtung ablaufen, z. B. das Abkühlen einer Tasse Kaffee. Sie werden „selbsttätige Prozesse“ genannt. Dies ist für die Mehrzahl der Prozesse

26 Backhaus und Schlichting (1981a).

27 Backhaus (1982, S. 2).

28 Schlichting und Backhaus (1984); Schlichting und Backhaus (1987); Schlichting und Backhaus (1980); Schlichting (1983). Die darin vorgeschlagene Konzeptualisierung der Energieentwertung hat Eingang in Schulbücher und Lehrpläne der Sekundarstufe I gefunden, z. B. *Fokus Physik* (Schweitzer et al. 2015, 30 ff.) und *Impulse Physik* (Bredthauer et al. 2011, 84 f.).

29 Schlichting (1983).

unserer Alltagswelt der Fall: Die Abkühlung von Körpern oder das Zur-Ruhe-Kommen von Bewegungen sind unumkehrbar bzw. irreversibel. Der Kaffee wird sich nie durch Energieentzug aus der Umgebungsluft von selbst wieder erhitzen. Andererseits gibt es Prozesse, in denen Temperaturunterschiede größer werden, z. B. das Erhitzen von Wasser mittels eines Tauchsieders. Damit kann der von allein ablaufende Abkühlungsvorgang „zurückgespult“ werden. Für das Rückspulen unumkehrbarer Prozesse muss aber ein anderer Prozess ablaufen, für den wiederum Energie notwendig ist. In der Energieformensprache wird beim Tauchsieder elektrische in thermische Energie umgewandelt. Auch um andere Prozesse aufrechtzuerhalten, muss Energie zugeführt werden: Ohne das herabsinkende Gewichtsstück in **Abb. 6.1** würde sich z. B. der Dynamo nicht dauerhaft drehen. Einmal in Schwung gesetzt, käme er von sich aus zum Stillstand.

6

Schluchting und Backhaus (1984, S. 2) kennzeichnen Energieentwertung als „Ausdruck für die eingeschränkte Einsetzbarkeit der Energie nach einer Energieumwandlung“ bei gleichzeitiger Energieerhaltung. Als eine Analogie dient das Geschirrspülen. Dabei wird das Wasser nicht mengenmäßig verbraucht, kann jedoch im Anschluss nicht in gleicher Qualität erneut für das Spülen weiteren Geschirrs verwendet werden. Das Wasser ist entwertet; es wird von wertvollem Trink-/Spülwasser in weniger wertvolles Abwasser umgewandelt.

Im Arbeitsbuch werden verschiedene Beispiele für Prozesse der Entwertung oder Aufwertung beschrieben, z. B. die Erwärmung des Wassers eines Wasserfalls, das einfach in ein Becken hinunterfällt (Energieentwertung), im Unterschied zum Hinabströmen beim Antreiben eines Generators, wodurch das Wasser weniger erwärmt wird und die gewonnene elektrische Energie genutzt werden kann, um einen Teil des Wassers wieder hochzupumpen (Rückspulung, Aufwertung). Eine Energieart wird als umso wertvoller bezeichnet, je vollständiger sie in andere umgewandelt werden kann. Der Wert mechanischer oder elektrischer Energie ist demnach höher als der von thermischer Energie. Thermische Energie auf hoher Temperatur ist zudem wertvoller als thermische Energie auf niedriger Temperatur. Mit einem Reservoir der Anfangstemperatur 90 °C kann der Wärmefluss in eine Kaffeetasse einen vorangegangenen Abkühlungsprozess von 50 °C auf Zimmertemperatur rückspulen. Das Reservoir muss nur groß genug sein. Mit

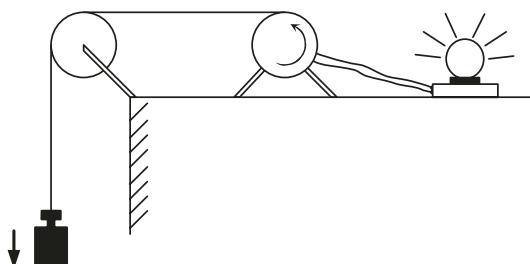
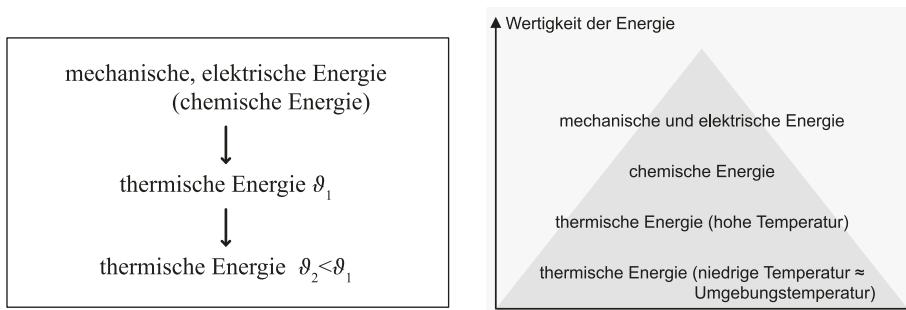


Abb. 6.1 Das Schwungrad eines Dynamos hat die Tendenz stehen zu bleiben; das herabsinkende Gewichtsstück hält den Dynamo entgegen dieser Tendenz in Rotation; dabei wird mechanische Energie in elektrische und schließlich in Strahlungsenergie umgewandelt: die Lampe leuchtet (nach Schluchting und Backhaus 1984, S. 2)



■ Abb. 6.2 Links: Rangfolge der Energiearten nach Schlichting und Backhaus (1984, S. 8); die Beschreibung fand Niederschlag in Schulbüchern (z. B. rechts: *Impulse Physik 7/8* Bredthauer et al. (2016, S. 18))

einem Reservoir auf 40 °C gelingt das nicht – unabhängig von der Menge der verfügbaren Energie. Thermische Energie auf Umgebungstemperatur kann ohne zusätzliche Prozesse nicht weiter genutzt werden. Auf diesen Bewertungsgrundlagen wird eine Rangfolge der Energiearten abgeleitet (■ Abb. 6.2).

Wenn man einen Abkühlungsprozess mittels elektrischer Energie rückspult, wird die thermische Energie wieder aufgewertet. Die Abwertung der elektrischen Energie ist jedoch größer als die Aufwertung der thermischen Energie durch die Erwärmung, sodass sich in der Gesamtbilanz eine Entwertung ergibt.

Im traditionellen Unterricht wird die Energie als *Voraussetzung* für den Ablauf von Prozessen betont („Fähigkeit, Arbeit zu verrichten“). Das Konzept der Energieentwertung lenkt die Aufmerksamkeit auf die Frage, wodurch Prozesse *verursacht* und angetrieben werden: „Nicht die Energie ist ... als Antriebsursache für technische und natürliche Abläufe anzusehen. (...) Vielmehr ist es die Energieentwertung, durch die alle Vorgänge in Gang gesetzt und gehalten werden“³⁰. Prozesse laufen demnach ab, weil Energie entwertet werden kann, z. B. beim Abkühlen der Kaffeetasse. „Entwertung“ erlangt so eine positive Bedeutung. Im Abschnitt „Energiesysteme“ des Arbeitsbuchs wird ausgeführt, wie der Mensch sich über die Aufnahme und Entwertung hochwertiger chemischer Energie (z. B. mittels Zucker und Sauerstoff) am Leben erhält und zu Bewegungen befähigt wird.³¹

■ Nutzenergie, Wirkungsgrad

Ein qualitatives Verständnis des Energiesparens besteht darin, „Energieentwertungen zu größtmöglichen Energieaufwertungen zu nutzen. Dann nämlich ist der Verbrauch an Energie und die damit verbundene thermische Verschmutzung der Umwelt am kleinsten.“³² Im Arbeitsbuch wird gezeigt, wie diese Definition des Energiesparens bei einer Elektroheizung zu Schwierigkeiten mit dem energetischen

30 Schlichting und Backhaus (1987, S. 15).

31 Ein grundlegender Gedankengang von der Energieentwertung (qualitativ) zur Entropie und zur Strukturbildung (► Abschn. 12.4.2) wird in Schlichting (2000a, 2000b, 2000c) entwickelt.

32 Schlichting und Backhaus (1987, S. 17).

Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutzen und Aufwand führt. Da die gesamte elektrische Energie (Aufwand) zum Heizen verwendet wird (Nutzen), ist der Wirkungsgrad $\eta = 1$. Das scheint für einen optimalen Prozess zu sprechen. Im Wirkungsgrad η kommt der Wertverlust der Energie (hochwertige elektrische Energie wird in weniger wertvolle thermische Energie umgewandelt) nicht zum Ausdruck. Daher wird von Backhaus und Schlichting der *exergetische* Wirkungsgrad η^* als Quotient aus dem Aufwand von Energie bei optimaler Prozessführung und dem tatsächlichen Aufwand eingeführt:

$$\eta^* = \frac{\text{minimaler Aufwand}}{\text{tatsächlicher Aufwand}} . \quad (\text{Gl. 6.5})$$

6

Ein Beispiel dient im Buch zur Veranschaulichung: Um einem Zimmer 1 kWh thermische Energie zuzuführen, benötigt man bei einer Widerstandsheizung 1 kWh elektrische Energie. Mit dieser elektrischen Energie könnte man stattdessen auch eine Grundwasserwärmepumpe betreiben, um den Raum zu beheizen. Wenn das Grundwasser eine Temperatur von 283 K hat und die Zimmertemperatur 293 K beträgt, ließen sich bei einer idealen Prozessführung (Carnot-Prozess) mit 1 kWh elektrischer Energie 29,3 kWh thermische Energie gewinnen (► Gl. 6.3). Der geringe exergetische Wirkungsgrad von $\eta^* = 0,03$ nach ► Gl. 6.5 drückt also gegenüber dem energetischen Wirkungsgrad von $\eta = 1$ die höchst ineffektive Prozessführung bei der Elektroheizung aus.

■ Energieumwandlung, Energietransport

Nach der grundlegenden Klärung des Energiekonzepts und der Energieentwertung werden im Arbeitsbuch an vielen Beispielen Energieumwandlungen (mechanisch, elektrisch, thermisch, chemisch) und die damit verbundenen Energieentwertungen und -aufwertungen behandelt. Eine wichtige Rolle spielen Wärmekraftmaschinen und Wärmepumpen. Der Begriff „Energiewandler“ wird eingeführt als „Vorrichtung, die die Entwertung einer gegebenen Energieart zur Aufwertung einer anderen Energieart veranlasst“³³. Es schließt sich ein Abschnitt zum Energietransport an (mechanisch, elektrisch, thermisch, stofflich, chemisch, Strahlung).

■ Energiespeicherung, Energievorkommen und Energiesysteme

Unter Rückbezug auf den exergetischen Wirkungsgrad werden im Arbeitsbuch „reine Energiespeicher“ (mechanisch, elektrisch, chemisch) von thermischen Energiespeichern unterschieden und an Beispielen kurz erläutert (u. a. Wasserstoff, Schwungrad, erwärmtes Wasser). Einen größeren Umfang nehmen das Kapitel „Energievorkommen“ ein sowie die Themen Solarenergie und solarbetriebene Kreisläufe der Erde. Den Abschluss des Arbeitsbuchs und damit des Unterrichtsgangs zu „Energie und Energieentwertung“ bildet ein Kapitel zu Energiesystemen. Es behandelt den Energieumsatz bei menschlichen Tätigkeiten, die Energetik der Fortbewegung und den Haushalt als Energiesystem und schätzt Energieaufwände auch quantitativ ab.

33 Schlichting (1983, S. 59).

■ Empirische Ergebnisse

Empirische Studien zu Lernwirkungen der Konzeption wurden nicht durchgeführt.

■ Unterrichtsmaterialien

Schlichting, H. J. (1983). *Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt*. Heidelberg: Quelle & Meyer. (► [Materialien zum Buch](#)³⁴).

In diesem Arbeitsbuch für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufen I und II ist die Konzeption als Gesamtgedankengang veröffentlicht. Das Buch enthält überwiegend textliche Darstellungen und nur wenige Abbildungen oder Hinweise auf Experimente. Weitere Vorschläge für eine schulische Umsetzung der Konzeption sind in Zeitschriftenaufsätzen veröffentlicht (Schlichting und Backhaus 1980, 1984, 1987; Backhaus und Schlichting, 1981a, 1981b).

6.4 Energie und Entropie als mengenartige Größen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zum Karlsruher Physikkurs (KPK)³⁵ aus dem Kapitel Dynamik (► Abschn. 4.3) aufgegriffen und erweitert dargestellt. Der KPK wurde an der Universität Karlsruhe als neuartige Darstellung physikalischer Strukturen für Schule und Hochschule insbesondere von Friedrich Herrmann ausgearbeitet. Im ► Abschn. 4.3 finden sich bereits Basisinformationen zur Entwicklung der Gesamtkonzeption und zu den Diskussionen, die er ausgelöst hat.

■ Grundlagen: Mengenartige Größen, Energiestrom und Energieträger

Der Karlsruher Physikkurs geht anders als die traditionelle Physik von einer Struktur der allgemeinen Thermodynamik³⁶ aus, die aus einer physikalisch-fachlichen Perspektive lernpsychologische und lernökonomische Vorteile verspricht (► Abschn. 4.3). Dies ist ein disruptives Vorgehen. Werden zur physikalischen Beschreibung als unabhängige Variablen die sogenannten *extensiven Größen* X_1, X_2, \dots, X_n gewählt, so lässt sich jede Energieänderung eines Systems als:

$$dE = \xi_1 dX_1 + \xi_2 dX_2 + \dots + \xi_n dX_n \quad (\text{Gl. 6.6})$$

schreiben (siehe auch ► Gl. 6.1). Die physikalischen Größen ξ_i sind die sogenannten *intensiven Größen*. Die Energie E und die ξ_i sind Funktionen der extensiven Variablen, die intensiven Größen $\xi = \frac{\partial E}{\partial X_i}$ sind die partiellen Ableitungen der Energie.

Extensive physikalische Größen sind z. B. der Impulsvektor \vec{p} , das Volumen V , die elektrische Ladung Q , aber auch die Entropie S . Intensive physikalische Größen sind z. B. die Geschwindigkeit \vec{v} , der Druck p , das elektrische Potenzial

34 ► <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>

35 Herrmann et al. (2014).

36 Falk (1968).