

■ 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 $\xi_i = \frac{\partial E}{\partial X_i}$ 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).

φ oder die absolute Temperatur T . Die extensiven und die intensiven Größen lassen sich meistens anschaulich unterscheiden: Werden zwei physikalische Systeme additiv mit gleichen Werten der intensiven Größen zusammengesetzt, so addieren sich die Werte der extensiven Größen, die der intensiven bleiben dagegen gleich. Ein Beispiel: zwei Gasbehälter mit den Volumina V_1 und V_2 und gleichem Druck p werden verbunden. Das Volumen des gesamten Gases als extensive Größe ist dann $V_1 + V_2$, der Druck als intensive Größe bleibt p .

Der allgemeine Ausdruck aus ► Gl. 6.6 schreibt sich mit konkreten Größen als:

$$dE = TdS - pdV + \varphi dQ + \vec{v} d\vec{p} + \dots \quad (\text{Gl. 6.7})$$

Aus ► Gl. 6.6 folgt: 1) Es treten Paare von physikalischen Größen auf, die jeweils ein Gebiet der Physik charakterisieren. Zum Beispiel stehen die elektrische Ladung und das elektrische Potenzial für die Elektrizitätslehre (► Abschn. 8.3.1). Nach dieser Darstellung sollte die Wärmelehre auf den physikalischen Größen Entropie und Temperatur basieren. Für feste und flüssige Körper trägt diese Vereinfachung. 2) ► Gl. 6.7 lässt sich mit $\frac{dX}{dt} = I_X$ – es wird grob gesagt durch dt „geteilt“ – wie folgt schreiben:

$$I_E = TI_S - pI_V + \varphi I_Q + \vec{v} \vec{I}_p + \dots$$

In der Sprache des Karlsruher Physikkurses sagt man, dass die X -Ströme die Energieträgerströme sind und die mengenartigen Größen X die Träger der Energie. Fließt z. B. der elektrische Strom aus einem Raumgebiet auf einem höheren elektrischen Potenzial φ_2 zu einem niedrigeren elektrischen Potenzial φ_1 , so beträgt der Nettoenergiestrom $I_E = \varphi_2 I_Q - \varphi_1 I_Q = U I_Q$. Die intensiven Größen stellen somit ein Beladungsmaß der Energieträger eines Energiestroms dar. In unserem Fall gilt: Je höher das elektrische Potenzial an einer Stelle im Vergleich zu einem festen Potenzial an einer anderen Stelle ist, desto mehr Energie fließt bei gleicher elektrischer Stromstärke. Bei Prozessen, die traditionell mit Energieumwandlungen beschrieben werden, wechselt in der Karlsruher Sprache der Energiestrom seinen Träger.

Einige extensive Größen lassen sich als mengenartige Größe konzeptualisieren (► Abschn. 4.3). Über mengenartige Größen kann man wie in der Alltagssprache über Wasser, Luft oder Sand sprechen. Der Karlsruher Physikkurs vergleicht eine mengenartige Größe mit einem abstrakten oder masselosen Stoff, um etwas Distanz zur intuitiv zugänglichen „Masse“ (oft missverstanden als Stoffportion) zu schaffen. Im Karlsruher Physikkurs wird das Konzept extensiver und mengenartiger Größen anhand des Themas strömendes Wasser als Prototyp der Begriffsbildung eingeführt. Das Wasser fließt dabei in Leitungen. Die mengenartige Größe ist die Wassermenge in Litern, die intensive Größe der Druck. Die Druckdifferenz ist dann der Antrieb der Wasser- und Luftströme. Dieses Konzept heißt auch *Strom-Antrieb-Konzept*.

■ Energie- und Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs

Die Entscheidung, die Physik strukturell auf extensiven und mengenartigen physikalischen Größen aufzubauen, führt aus stoffdidaktischer Perspektive zu einer Reihe von Konsequenzen. Eine wichtige Konsequenz ist die Möglichkeit einer eigenständigen Wärmelehre, getrennt von der Energielehre. Auch wenn auf die Prozessgröße Q verzichtet wird, bleibt die innere Energie U ein zentraler Bestandteil der traditionellen Wärmelehre, die damit eine energetische Wärmelehre ist.

Eine Wärmelehre für Stoffe bei konstantem Volumen sollte also mit den Größen Temperatur und Entropie auskommen, denn mit der obigen Struktur gilt $\Delta E = T \Delta S = Q$ (► Gl. 6.4). Anders gesagt: die Energieform Wärme besteht aus zwei thermischen Variablen, der Temperatur und der Entropie. Der entropische Ansatz entspricht aber nicht den üblichen Lehrbuchdarstellungen. Wir werden weiter unten zeigen, dass die Temperatur als intensive Größe den Wärmegrad eines Körpers beschreibt und die Entropie in dieser Konzeption seinen Wärmehalt. Damit ist eine entropische Wärmelehre ohne Energie möglich.

■ Energielehre des KPK

Die Energie wird im Karlsruher Physikkurs als universeller Treibstoff konzeptualisiert, der von Energieträgern transportiert wird. Dabei fließt ein Energiestrom immer gemeinsam mit einem Trägerstrom. Der Trägerstrom kann mit Energie beladen werden. Energie wird in bestimmten Systemen gespeichert, es gibt Energiequellen und Energieempfänger. Manche Systeme werden gebaut, damit der Energieträger wechseln kann, dies sind die Energieumloader. Im Anfangsunterricht zur Energie wird weiter zwischen „Einweg-“ und „Pfandflaschen-Energieträgern“ unterschieden (s. u.). Dieses Grundgerüst findet sich im Karlsruher Physikkurs in zwei Varianten, einer kürzeren Standardvariante, die dem Lehrbuch zur Sekundarstufe I³⁷ vorausgestellt ist, und einer älteren ausführlichen Variante, dem „Energiebuch“³⁸, das ursprünglich für die Altersstufe von 10 bis 12 Jahren entwickelt wurde. Die Teilgebiete der Schulphysik – Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre – können nach dem Karlsruher Kurs unabhängig von der Energielehre unterrichtet werden.

Die Energie wird als mengenartige physikalische Erhaltungsgröße auf der sprachlichen Ebene eingeführt. Dazu wird die Metapher des universellen Treibstoffs genutzt. Die Sprachebene steht bei der Einführung der Energie im Vordergrund.³⁹ Ein Beispiel für eine sprachliche Konzeptualisierung der Energie ist eine Reise: Sie kann mit einem Auto, einem Flugzeug, einem Pferd, einem Fahrrad oder zu Fuß erfolgen. Dabei ist immer ein Treibstoff notwendig: Benzin, Kerosin, Hafer oder Nahrung. Es kommt also nicht unbedingt darauf an, wie wir reisen. Es kommt darauf an, dass wir einen Treibstoff haben. Alle Treibstoffe enthalten etwas Gemeinsames: Es ist die Energie.

37 Herrmann et al. (2014).

38 Falk und Herrmann (1981).

39 Man kann hier auch von einem Sprachspiel sprechen. Wie z. B. bei einem Schachspiel die Figuren bestimmte Züge ausführen können und damit Regeln folgen, wird das Wort „Energie“, in der Sprache ebenfalls nach bestimmten Regeln in bestimmten Kontexten verwendet.

Dieses Verfahren kann jetzt für das Heizen von Gebäuden, Rasenmähen und andere Prozesse angewandt werden. Geräte, Maschinen und Lebewesen brauchen Energie. Die Energie bekommt man mit Treibstoffen, Brennstoffen oder Nahrung. Dies sind die Energieträger. In einem nächsten Schritt wird anhand von Tabellenwerten und Nahrungsmitteln die Einheit der Energie (Joule) eingeführt und die Energie von verschiedenen Trägern sowie Prozessen verglichen – man betrachtet z. B. die Energie, die ein Auto für eine einstündige Fahrt benötigt. Im weiteren Verlauf werden die Energieträger Elektrizität, bewegte Luft, warmes Wasser, Licht, zusammengepresste Luft und als sprachliches Element der Drehimpuls eingeführt: Wenn sich ein Teil eines Motors oder eines Geräts dreht, dann sagt man, dass der Drehimpuls der Träger der Energie ist. Die Frage des Energieverbrauchs kann mit der Analogie zum Wasserverbrauch diskutiert werden. Wenn das Wasser zum Waschen benutzt wird, sagen wir, es wird verbraucht. Aber es ist ja noch da, nur nicht mehr sauber.⁴⁰ So geht es auch mit der Energie: Ein Gerät benötigt Energie, die aber wieder meist mit anderen Trägern aus dem Gerät herausfließt. Der Karlsruher Physikkurs knüpft damit an die Alltagsvorstellungen von Schülerinnen und Schülern an.

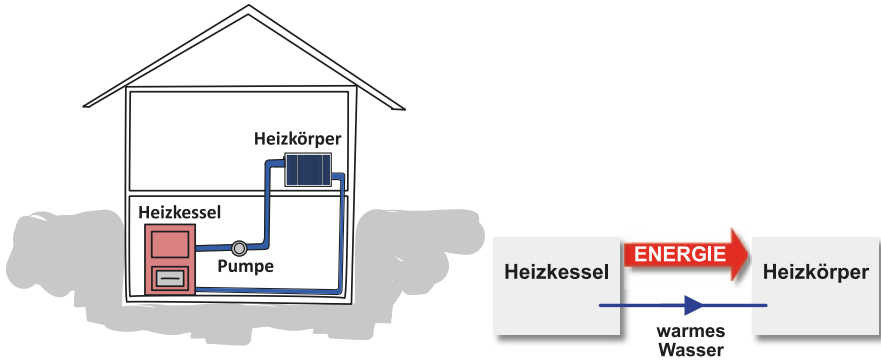
In den einzelnen Kapiteln werden die Energieträger, die anhand der Phänomene benannt wurden, mit den mengenartigen Größen in Verbindung gebracht: Die bewegte Luft hat Impuls, der Impuls trägt die Energie; mit dem Energiestrom fließt ein Impulsstrom. Und um vorzugreifen: Wasser hat Entropie, die Entropie trägt die Energie, mit dem Energiestrom fließt ein Entropiestrom. Dort wird auch die jeweilige intensive Größe als Beladungsmaß der Energie eingeführt.

In der Konzeptualisierung der Energie nach dem Karlsruher Physikkurs werden dann die Wege der Energie diskutiert. Zur Beschreibung des Energiestroms – Energie kann strömen – werden die Termini Energiequelle, Energieempfänger (auch Energiespeicher) eingeführt. Eine wichtige Rolle bei der Veranschaulichung spielen Energieflussbilder. Zum Beispiel fließt bei der Zentralheizung das warme Wasser als Energieträger vom Heizkessel, der Energiequelle, zum Heizkörper, dem Energieempfänger, und gibt dort die Energie an das Zimmer ab (■ Abb. 6.3).

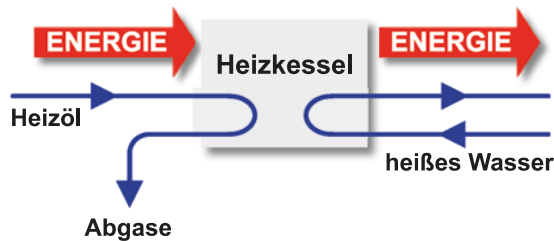
Eine genaue Analyse der Zentralheizung zeigt, dass das Wasser zur Quelle, dem Heizkessel, zurückfließt, um neu erhitzt zu werden. In diesem Fall wird der Energieträger Wasser mit einer Pfandflasche verglichen und als Mehrwegflaschen-Energieträger kategorisiert. Anders ist es z. B. beim Presslufthammer. Die Luft geht aus dem Presslufthammer in die Umgebung und wird nicht in den Kompressor zurückgeleitet. In diesem Fall wird von einem Einwegflaschen-Energieträger gesprochen.⁴¹

40 In der Konzeption von Backhaus und Schlichting wird das gleiche Beispiel für die Verbindung von Energieentwertung und Energieerhaltung verwendet (► Abschn. 6.3).

41 Heutzutage müsste natürlich auch diskutiert werden, dass nur die Mehrwegflaschen wieder in einer Abfüllanlage befüllt werden, auch wenn es für die meisten Einwegflaschen Pfand gibt.



■ **Abb. 6.3** Die Energie geht mit dem Energieträger „warmes Wasser“ vom Heizkessel zum Heizkörper; rechts: das dazugehörige Energieflussbild (nach Herrmann et al. 2014, Tablet-Version, Kap. 1.2)



■ **Abb. 6.4** Ein Heizkessel als Energieumwandler vom Energieträger Heizöl auf den Energieträger (heißes) Wasser (nach Herrmann et al. 2014, Tablet-Version, Kap. 1.3)

Danach werden die Energieumwandler eingeführt. Bei der Zentralheizung muss in den Kessel immer wieder ein Brennstoff, z. B. Heizöl nachgefüllt werden. Der Heizkessel lädt die Energie vom (Einwegflaschen-)Energieträger Heizöl in den (Mehrwegflaschen-)Energieträger (warmes) Wasser um (■ Abb. 6.4).

Mithilfe der Energieumwandler können jetzt Energietransporte mit vielen Umladungen besprochen werden, z. B. das Betreiben einer LED mit einer Solarzelle und einem Akkumulator. In einem letzten Schritt wird die Energiestromstärke $P = I_E = \frac{E}{t}$ eingeführt und angewendet. Dabei wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die Energiestromstärke als konstant angenommen werden kann.

Energie wird als Größe eingeführt, welche die Energieerhaltung implizit mit sich trägt und die transportiert werden kann. Die Energielehre nach dem Karlsruher Physikkurs kennt keine Energieformen und keine Umwandlung, stattdessen Energieträger und Energieträgerwechsel. Das Konzept der Energieentwertung wird ebenfalls nicht verwendet. In der Konzeption wird dieser Aspekt in der Wärmelehre auf andere Weise konzeptualisiert.

■ Wärmelehre des KPK: Entropie und Temperatur

Die Alltagsvorstellungen zur Wärme weisen intensive, mengenartige und energieartige Elemente auf.⁴² Der Karlsruher Physikkurs schlägt aus physikdidaktisch-lernpsychologischer Sicht die Strategie des Anknüpfens an Schülervorstellungen in Verbindung mit einer Umdeutung vor.⁴³ Im Alltag wird über Wärme (und ihr semantisches Umfeld) wie über die intensive Größe Temperatur (im Sinne eines Wärmegrads von heiß und kalt – z. B. „Was für eine Hitze heute!“) und wie von einer Menge an Wärme (z. B. „Der Ofen gibt viel Wärme ab.“) gesprochen. Der Karlsruher Physikkurs deutet die intensiven Aspekte der Alltagssprache zur physikalischen Größe Temperatur um – wie die traditionelle Physik auch –, der mengenartige Charakter der Alltagswärme wird zur Entropie umgedeutet.

6

Diese Umdeutung ist physikalisch begründet⁴⁴, d. h., eine Wärmelehre für Stoffe ohne Volumenänderung kann mit den Variablen T und S auskommen, die dann über $dE = TdS$ mit der Energie verknüpft sind. Die Analogie zu $dE = \varphi dQ$ deutet an, dass über die Entropie S im Prinzip wie über die elektrische Ladung Q gesprochen werden kann, d. h. wie über eine mengenartige Größe: Es ist viel oder wenig Entropie in einem Körper enthalten, und Entropie kann von einem Körper zum anderen fließen. Wir wissen auch, dass Entropie nur zunehmen oder erzeugt werden kann. Sie ist keine Erhaltungsgröße. Und auch diese Eigenschaft widerspricht nicht der Mengenartigkeit. Die Alltagssprache erlaubt es, mit dem Substantiv „Wärme“ im Sinne einer Wärmemenge wie über die Entropie zu sprechen: „Es ist viel oder wenig Wärme in einem Körper“, „Wärme kann von einem Körper zum anderen fließen“, „Wärme kann durch Reibung erzeugt werden“. Entropie und (Alltags-)Wärme können also synonym verwendet werden. Diese Umdeutung bringt allerdings die Schwierigkeit mit sich, dass die Bezeichnung *Wärme* außerhalb des Karlsruher Ansatzes schon mit der physikalischen Größe Wärme Q verknüpft ist: Q und die Wärme im Sinne der Karlsruher Unterrichtskonzeption (Formelzeichen S) haben aber nichts gemein. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass die Entropie üblicherweise über Q oder statistische Betrachtungen eingeführt und als Rechengröße gehandhabt wird, um zu beurteilen, ob ein Prozess reversibel oder irreversibel ist.

Im Karlsruher Physikkurs wird die Trennung zwischen dem intensiven und dem mengenartigen Charakter der Wärmephänomene mit Umgießversuchen eingeleitet. Ein Liter Wasser mit der Temperatur von 80 °C wird gleichmäßig auf zwei Gläser verteilt. Die umgangssprachliche Wärme oder Wärmemenge, die in der Konzeption später zur Entropie wird, hat sich halbiert – waren in dem einen Liter 10 Einheiten Wärme, dann sind in den beiden Gläsern jeweils 5 Einheiten Wärme –, die Temperatur ist gleich geblieben. Damit wird die Entropie sprachlich als physikalische Größe eingeführt: Die umgangssprachliche „Wärmemenge“ heißt in der Physik Entropie, das Formelzeichen ist S und die Einheit Carnot, abgekürzt Ct. Wird später

42 Fischler und Schecker (2018).

43 Wilhelm und Schecker (2018, Kap. 3.3).

44 Job (1972).

die Beladung des Energieträgers Entropie diskutiert, so zeigt sich, dass das Carnot mit der SI-Einheit J/K identisch ist. Die Temperatur ϑ in °C wird intuitiv vorausgesetzt, ebenso negative Temperaturwerte auf der Celsiusskala.

Danach wird durch das Vergleichen von gleichen Wassermengen unterschiedlicher Temperatur und ungleichen Wassermengen gleicher Temperatur die Aussage formuliert, dass ein Gegenstand umso mehr Entropie enthält, je höher seine Temperatur und seine Masse sind. Entropie und Temperatur hängen also wie Impuls und Geschwindigkeit voneinander ab, obwohl sich die Größenpaare physikalisch unterscheiden.

Die Prozesse des Erwärmens oder Abkühlens von Körpern bis zum thermischen Gleichgewicht werden physikalisch mit dem Strom-Antrieb-Konzept erklärt. Eine Temperaturdifferenz ist der Antrieb für einen Entropiestrom: Die Entropie fließt von Stellen hoher zu Stellen niedriger Temperatur, bis die Temperatur der beiden Körper gleich ist. Insbesondere wird in diesem Zusammenhang diskutiert, warum Holz, Styropor und Metall in einem Raum die gleiche Temperatur haben, sich aber das Holz warm und das Metall kalt anfühlt. Dies hat seine Ursache in den unterschiedlichen Entropieleitfähigkeiten der Materialien.

Um die Entropie von Stellen niedriger zu Stellen hoher Temperatur zu befördern, braucht es eine Entropiepumpe, die im Alltag auch Wärmepumpe heißt. Der Kühlschrank und die Klimaanlage sind solche Pumpen. Mithilfe des Kühlschranks wird Entropie aus seinem Inneren in die Umgebung herausgepumpt, die Temperatur im Inneren sinkt. Kälte ist also die Abwesenheit von Wärme. Hier geht der Unterrichtsgang zuerst auf die Alltagssprache zurück, um die Alltagsvorstellung von Kälte aufzugreifen. Dann kann die Kälte als Abwesenheit von Entropie erklärt werden. Mithilfe einer Entropiepumpe wird narrativ der absolute Nullpunkt plausibel gemacht: Selbst die beste Entropiepumpe der Welt kann irgendwann keine Entropie mehr aus einem Gegenstand pumpen – und zwar bei der Temperatur $\vartheta = -273,15\text{ °C}$. Dies führt zur Kelvinskala. In diesem Zusammenhang wird auch eine Funktion $S(T)$ anhand eines Diagramms diskutiert, der Entropieinhalt eines Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur. Später kann dieses Thema mit der Einführung der spezifischen Entropiekapazität vertieft werden.

Der 2. Hauptsatz wird wieder über das Anknüpfen an Alltagserfahrungen eingeführt. An verschiedenen Prozessen wird gezeigt, dass durch chemische Reaktionen, den elektrischen Strom in einem Draht und durch mechanische Reibung Entropie erzeugt werden kann. An den entsprechenden Stellen wird es „warm“, ohne dass Entropie zufließt. Es liegen demgegenüber keine Erfahrungen vor, dass Entropie verschwinden kann. Man kann sie nur weggleiten; dazu braucht man jedoch einen weiteren Körper (ein weiteres System), der die Entropie aufnimmt. Daher kann Entropie zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Diese Aussage hat eine bemerkenswerte Konsequenz: Wenn Entropie nicht einfach verschwinden kann, können Vorgänge, bei denen Entropie erzeugt wird, nicht einfach von allein rückwärts ablaufen. Sie sind irreversibel.

Die einfache Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs führt die konstante Entropiestromstärke mit $I_S = \frac{\Delta S}{\Delta t}$ ein und diskutiert die Abhängigkeit der Entropieleitung von den Leitereigenschaften Material, Querschnittsfläche und Leiterlänge. In diesem Zusammenhang können z. B. die Wärmeisolation von

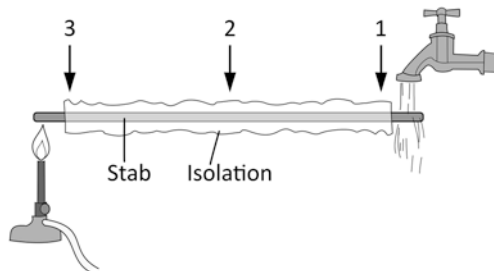
Häusern oder die Thermosflasche physikalisch erklärt werden. Weiter wird über den konvektiven Entropietransport berichtet, z. B. bei einer Zentralheizung in einem Haus, einem Heizkörper in einem Zimmer oder dem Golfstrom. Bei konvektiven Entropietransporten nimmt eine strömende Flüssigkeit oder ein strömendes Gas die Entropie mit. Insbesondere benötigt der konvektive Entropietransport damit keinen Temperaturunterschied als direkten Antrieb. Über große Entfernungen wird Entropie nur konvektiv und nicht über die Wärmeleitung transportiert.

Die Verbindung zur Energielehre wird über die Entropie hergestellt. Die Entropie wird zum Energieträger, die absolute Temperatur zum Beladungsmaß für den Energiestrom, der zusammen mit dem Entropiestrom fließt: $I_E = P = T \cdot I_S$. Mithilfe dieser Formel wird die Entropieerzeugung bei einem Entropiestrom berechnet. Diese erfolgt über das Beispiel eines Stabes, dessen Enden durch eine Flamme und einen Wasserstrom auf jeweils konstanten Temperaturen gehalten werden (■ Abb. 6.5). An den Stellen 3 und 1 ist die Energiestromstärke P gleich, aber T_1 kleiner als T_3 . Daher gilt $\frac{P}{T_3} < \frac{P}{T_1}$ und damit $I_{S3} < I_{S1}$ – es fließt mehr Entropie aus dem Stab als in den Stab hinein.

Über den Zusammenhang zwischen dem Energie- und dem Entropiestrom berechnet sich auch die erzeugte Entropie in einem elektrischen Widerstand. Weiter erlaubt dieser Zusammenhang die physikalische Analyse von Wärmemotoren, z. B. der Dampfturbine, der Kolbendampfmaschine oder von Verbrennungsmotoren. Um Wärmemotoren so zu betreiben, dass möglichst viel Energie mit einem mechanischen Energieträger hinausfließt, müssen eine Entropiequelle mit hoher Temperatur und eine Möglichkeit, die Entropie bei möglichst niedriger Temperatur aus dem Motor herauszuholen, zur Verfügung stehen.

Anstelle des Wirkungsgrads η werden bei Energieumladern der Verlust an Energie durch die Erzeugung von Entropie und der Verlustgrad V diskutiert. Beim Bau von Maschinen, die Energie umladen, geht es in der Struktur des Karlsruher Kurses also darum, Energieverluste durch Entropieerzeugung zu vermeiden. Wirkungsgrad η und Verlustgrad V hängen einfach zusammen: $\eta = 1 - V$.

Zum Schluss der energetischen Aspekte der Entropielehre wird die Verbindung zur traditionellen (energetischen) Wärmelehre hergestellt, d. h. zum



■ Abb. 6.5 Am rechten Ende des Stabes fließt mehr Entropie heraus, als links hineingeflossen ist (nach Herrmann et al. 2014, Tablet-Version ► Kap. 11.3)

Zusammenhang zwischen Energiezufuhr und Temperaturänderung. Insbesondere wird dabei die spezifische Wärmekapazität eingeführt.

■ Empirische Ergebnisse

Die Wirkungen des Karlsruher Physikkurses im Unterricht und insbesondere in der Wärmelehre wurden von Starauschek (2001) mit Schülerbefragungen untersucht. Eine erste Studie zu Energie, Entropie und Irreversibilität führten Kesidou und Duit (1991) durch. Eine systematische Untersuchung der Energielehre nach dem Karlsruher Kurs liegt nicht vor.

Starauschek führte Mitte bis Ende der 1990er-Jahre eine Vollerhebung in den Klassen durch, die nach dem KPK unterrichtet wurden. In den einzelnen Klassenstufen wurden vergleichbare traditionell unterrichtete Stichproben zusammengestellt. Die Stichprobe zur Untersuchung der Wärmelehre in Klassenstufe 9 umfasste 155 Schülerinnen und Schüler in 7 Klassen; davon wurden 4 Klassen einstündig unterrichtet. Als Vergleichsgruppe wurden Klassen aus benachbarten Schulen gewonnen: 75 Schülerinnen und Schüler aus drei Klassen.

Grundlegende Konzepte der Wärmelehre scheint der Karlsruher Kurs besser zu vermitteln. Mädchen und Jungen erzielen bei unterschiedlichen Aufgaben bessere Ergebnisse als traditionell unterrichtete Schülerinnen und Schüler, die auf offene Fragen in ihren jeweiligen physikalischen Begrifflichkeiten geantwortet haben: Bei der physikalischen Beschreibung von Temperatenausgleichsvorgängen wird das Strom-Antrieb-Modell mit Temperatur und Entropie richtig angewendet. „Karlsruher“ Schülerinnen und Schüler trennen zwischen einer intensiven und mindestens einer extensiven Größe. Die traditionell unterrichteten Schülerinnen und Schüler trennen weniger zwischen der Temperatur und der energetischen Wärme oder der Energie. KPK-Lernende können Temperatenausgleichsvorgänge besser als traditionell unterrichtete Schülerinnen und Schüler beschreiben (ca. 70 % gegenüber 35 % bei der Beschreibung der Abkühlung einer Limonadenflasche⁴⁵); insbesondere beschreibt eine größere Gruppe das Wärmeempfinden physikalisch (ca. 30 % gegenüber 5 %).⁴⁶ Hier ist der Anteil der KPK-Schülerinnen und -Schüler, die Kältevorstellungen äußern, gegenüber den traditionell Unterrichteten kleiner (ca. 20 % gegenüber 50 %⁴⁷). Es gelingt also die Umdeutung der alltagsprachlichen Wärme in die Entropie. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Karlsruher Konzeption der Wärmelehre geeignet ist, Konzeptwechselprozesse einzuleiten. Diese Ergebnisse wurden auch in experimentellen Studien mit stark kontrollierten Lehr-Lern-Arrangements bestätigt.⁴⁸

Keine Unterschiede finden sich bei den Themen Phasenübergänge und Ausdehnung von Körpern, die aber im Unterricht nach dem Karlsruher Kurs auch nur am Rande behandelt werden. Die Daten deuten darauf hin, dass

45 Starauschek (2001, S. 190).

46 Starauschek (2001, S. 198 f.).

47 Starauschek (2001, S. 199).

48 Starauschek (2010); Crossley (2012).

KPK-Schülerinnen und -Schüler Energie und Entropie nicht unterscheiden.⁴⁹ Offen sind auch Fragen nach Kenntnissen über die Entropieerzeugung und dem Zusammenhang zwischen Irreversibilität und Entropieerzeugung.

■ Unterrichtsmaterialien

► http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk_material.html

Die Unterrichtsmaterialien zum Karlsruher Physikkurs stehen online unter einer Creative-Commons-Lizenz zur Verfügung. Sie umfassen Schulbücher für die Sekundarstufen I und II, Unterrichtshilfen sowie Hochschulskripte. Es gibt druckbare Versionen und Versionen für Tablet-Computer. Wir weisen auf folgende Materialien besonders hin:

6

Falk, G. und Herrmann, F. (1981). *Neue Physik – Das Energiebuch*. Hannover: Schroedel.

Es handelt sich um das Schülerbuch für den physikalischen Anfangsunterricht und stellt eines der Konzepte dar, die auf der Energie als eigenständiger Größe aufbauen. Dabei werden weder die Kraft noch die Prozessgrößen Wärme und Arbeit verwendet.

Herrmann, F. (Hrsg.) (2014). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I. Band 1 Energie – Impuls – Entropie*.

Herrmann, F. (Hrsg.) (2014). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I: Unterrichtshilfen*.

Das Lehrbuch für den Physikunterricht in der Sekundarstufe I hat drei Bände, die das Themenspektrum der Schule abdecken. Die Unterrichtshilfen erläutern die physikalische Basis des Kurses, beschreiben die Experimente und geben praktische Hinweise für den Unterricht.

6.5 Energie vor Arbeit

In den traditionellen Ansätzen (► Abschn. 6.2) wird die Energie in der Mechanik über Kraft und Arbeit eingeführt. Mit den energetischen Betrachtungen in der Wärmelehre geht dann oft eine neue Konzeptualisierung der Energie einher, zum einen über Mischungsversuche als Wärmemenge – dies ist dann die Energie, die aufgrund eines Temperaturunterschieds vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur übergeht – und zum anderen über die Reibungsarbeit, die mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist und die innere Energie eines Körpers um die Energie $\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta$ erhöht. Dass es sich bei der Wärme um eine Prozessgröße handeln soll, wird den Lernenden dabei in der Regel nicht klar. Energie- und Wärmelehre scheinen daher im traditionellen Unterricht nur unzureichend verbunden zu sein. Die an der Ludwig-Maximilians-Universität München

⁴⁹ Kesidou und Duit (1991) kommen zu einer ähnlichen Einschätzung.