

# Fachliche Ergänzungen und Vertiefungen zum Kapitel “Unterrichtskonzeptionen zur Energie und Wärme“ (Kap. 6)

des Lehrbuchs

**Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum**

<https://www.springer.com/de/book/9783662630525>

*Erich Starauschek\* und Horst Schecker#*

(\*Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, #Universität Bremen)

In drei Texten erweitern wir die fachlichen Darstellungen zu folgenden Abschnitten des im Buch erschienenen Kapitels “Unterrichtskonzeptionen zur Energie und Wärme“ (Kap. 6)

Text A: Erweiterte fachliche Einordnung der Begriffe Energie und Wärme (zu Kap. 6.1)

Text B: Fachliche Vertiefungen zu Energie und Energieentwertung in der Unterrichtskonzeption von Backhaus und Schlichting (zu Kap. 6.3)

Text C: Fachliche Grundlagen zu Energie und Entropie als mengenartige Größen im Karlsruher Physikkurs (zu Kap. 6.4)

Für alle weiteren Ausführungen, insbesondere zu den damit verbundenen Unterrichtskonzeptionen mit den Darstellungen der jeweiligen Unterrichtsgänge sowie die weiteren Unterrichtskonzeptionen verweisen wir auf das vollständige Kapitel im Lehrbuch.

Die hier vorgelegten erweiterten Texte werden verantwortet von Erich Starauschek und Horst Schecker. Sie ersetzen nicht das Buchkapitel und sind nicht als Teil des Buches zitierfähig. Für Zitate bitte verwenden:

Starauschek, E. & Schecker, H. (2021). Fachliche Ergänzungen und Vertiefungen zum Kapitel “Unterrichtskonzeptionen zur Energie und Wärme“ (Kap. 6) des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum.

Retrieved from <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>

## Text A

# Erweiterte fachliche Einordnung der Begriffe Energie und Wärme

**Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.1 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum\***

<https://www.springer.com/de/book/9783662630525>

*Erich Starauschek und Horst Schecker*

Das physikalische Konzept „Energie“ geht auf naturphilosophische Überzeugungen zurück: Bei allen Prozessen und Veränderungen in der Natur sind die „Naturkräfte“ ineinander umwandelbar und „Etwas“ bleibt dabei erhalten. Ansätze zum Erhaltungsdenken finden sich z. B. in der Formulierung „Von Nichts kommt Nichts“. Mitte des 19. Jahrhunderts wurde die Umwandelbarkeit der „Naturkräfte“ (das Wort „Energie“ setzte sich in dieser Zeit erst allmählich durch) als Erhaltungssatz formuliert und mit ersten experimentellen Daten zum mechanischen Wärmeäquivalent belegt. Dazu kamen als weitere Erfahrungsgrundlage die gescheiterten Versuche, ein Perpetuum mobile zu konstruieren. Die Evidenz dieses Prinzips gründet in Überzeugung *und* Erfahrung. Die Energieerhaltung ist damit eine abstrakte Idee, die in der Physik als *Voraussetzung* gelten kann. Wenn es in einer experimentellen Situation einmal nicht zu gelten scheint, sucht man – gegebenenfalls durch Einführung weiterer Energieterme – so lange nach der fehlenden Energie, bis die Bilanz wieder ausgeglichen ist.

## Konzeptualisierungen von Energie

Wie lässt sich Energie „denken“ oder „konzeptualisieren“? Historisch standen sich eine quasi-materielle und eine funktionale Konzeptualisierung von Energie gegenüber: Energie als eine

---

\* Für alle weiteren Ausführungen, insbesondere zu den damit verbundenen Unterrichtskonzeptionen mit den Darstellungen der jeweiligen Unterrichtsgänge verweisen wir auf das vollständige Kapitel im Lehrbuch. Die hier vorgelegten erweiterten Texte werden verantwortet von Erich Starauschek und Horst Schecker. Sie ersetzen nicht das Buchkapitel und sind nicht als Teil des Buches zitierfähig. Stattdessen ist als Zitat zu verwenden: Starauschek, E. & Schecker, H. (2021). *Erweiterte fachliche Einordnung der Begriffe Energie und Wärme –* *Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.1 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum; Retrieved from <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>*

*unwägbar* Substanz, die von einem Körper auf einen anderen übergehen und dabei ihre „Erscheinungsform“ ändern kann, und Energie als *abstrakte Bilanzierungsgröße* – letztlich eine *Zahl*, die sich aus mathematischen Funktionen berechnen lässt und die bei Prozessen in der Natur ihren Zahlenwert beibehält. In der Thermodynamik ist die Energie eine abstrakte Bilanzierungsgröße, die aus einer Energiefunktion berechnet wird. Dennoch ist es bei Energiebilanzierungen erst einmal nur aufgrund vorhandener mentaler mengenartiger Vorstellungen hilfreich, metaphorisch oder abstrakt-anschaulich von der „Abgabe“ und „Aufnahme“ von Energie zu sprechen, die dann auch in einem System enthalten ist. Diese Vorstellungen finden ihren physikalischen und mathematischen Ausdruck in einer lokalen Kontinuitätsgleichung mit Energiedichte und Energiestromdichte.

Die Frage einer angemessenen Konzeptualisierung ist sowohl unter fachlichen als auch unter fachdidaktischen Aspekten nach wie vor aktuell. In der Thermodynamik genügt oft eine Konzeptualisierung der Energie als abstrakte Bilanzierungsgröße, die aus einer Energiefunktion berechnet wird. Gleichzeitig ist es bei Energiebilanzierungen hilfreich, metaphorisch oder abstrakt-anschaulich von „Energieflüssen“ oder „Energieströmen“ zu sprechen, die von einem System zum anderen fließen. Dies lässt sich auch physikalisch über die Kontinuitätsgleichung der Energie begründen.

In ihrer begrifflichen Genese ist die Energie eng mit der phänomenologischen Wärmelehre verbunden, d. h. es werden Prozesse betrachtet, bei denen sich die Temperatur ändert. Es zeigt sich, dass Temperatur und Energie nicht genügen, um solche thermodynamischen Prozesse zu beschreiben. Es muss hier in der Regel auch die Entropie betrachtet werden, eine physikalische Größe, die Auskunft über die Irreversibilität von Prozessen gibt und die im Unterschied zur Energie bei Prozessen zunehmen kann. Es gibt Vorschläge, die Entropie ebenso wie die Energie als mengenartige Größe<sup>1</sup> zu Konzeptualisieren, die im Unterschied zur Energie bei Prozessen zunehmen kann.

## Energieformen und Energieänderungen

### ■ Energie eines Systems

Bezogen auf ein bestimmtes System, d. h. anschaulich auf einen bestimmten Körper oder ein definiertes Raumgebiet, lässt sich dessen Gesamtenergie  $E_{\text{ges}}$  als eine Summe von Termen Konzeptualisieren, die *Energieformen* genannt werden können. Diese Energieformen können dann als in dem Körper oder Raumgebiet enthalten gedacht werden: Es sind *Speicherformen*. Dabei muss erst einmal nicht auf die physikalischen Größen Bezug genommen werden, aus denen die Terme aufgebaut sind. Der Bezug zu den Phänomenen genügt: Hat ein Körper eine Temperatur, so ist es mit dieser Vorstellung auch möglich, von im System gespeicherter thermischer Energie

---

<sup>1</sup> „Mengenartig“ ist dabei aber nicht mit Materie oder Substanz gleichzusetzen.

zu sprechen. Bewegt sich der Körper, so verfügt er über kinetische Energie, etc. Für viele Themen der Schulphysik ist diese erste vereinfachte Konzeptualisierung ausreichend, auch wenn sie nicht im allgemeinen Fall gilt. Mit den vereinfachten Energieformen kann man die Energie eines Systems in mechanische Energie (kinetische, potentielle), thermische, chemische, elektrische usw. Energie unterteilen, aber z. B. auch in Kernenergie.

Energieänderungen treten auf, wenn ein physikalisches System seinen Zustand ändert. In der Energiebilanz ändern sich mit der Näherung einer additiven Zerlegung der Energie bei den betrachteten Prozessen dann auch eine Energieform oder einzelne Energieformen (Gl. [A.1]):

$$\Delta E_{\text{ges}} = \Delta E_{\text{therm}} + \Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}} + \Delta E_{\text{chem}} + \Delta E_{\text{elekt}} + \dots \quad [\text{A.1}]$$

Gl. [A.1] umfasst sowohl Energieänderungen, die submikroskopisch modelliert werden können (z. B.  $\Delta E_{\text{therm}}$ ) als auch solche, die das System als Ganzes makroskopisch betreffen (z. B.  $\Delta E_{\text{kin}}$ ). Wieder lassen sich – wie oben bei den Speicherformen – die einzelnen Terme als Energieformen klassifizieren. Die Energie eines Systems ändert sich z. B. bei einer chemischen Reaktion oder thermisch bei einer Temperaturänderung, also liegt in diesen Fällen eine chemische bzw. eine thermische Energieänderung vor. Die Energieformen, die zur Änderung beitragen, werden auch „Austauschformen“ genannt, obwohl dies metaphorisch nicht korrekt ist, da nichts getauscht wird, sondern Energie von einem System auf das andere übergeht. Die Bezeichnungen *Transportform* oder *Übertragungsform* sind die bessere Wahl. Für die einzelnen Speicher- bzw. Transportformen gilt kein allgemeiner Erhaltungssatz. Ein System A kann z. B. thermische Energie von System B aufnehmen – es wird mit einem Körper höherer Temperatur (System B) in Kontakt gebracht –, die dann aber nicht vollständig *als thermische Energie* im System A enthalten ist.

Der zeitliche Ablauf des Prozesses der Energieänderungen wird dabei nicht betrachtet. Betrachtet werden nur die Energieänderung zwischen zwei Zuständen eines Systems und damit eine Bilanz. Als mentales Modell kann trotzdem ergänzend an eine fließendes „Energie“ gedacht werden. Wir können dann von einem Energiefluss sprechen, auch wenn wir nur bilanzieren; die Frage nach der Stärke dieses Flusses kann dann natürlich nicht gestellt werden, da das Zeitintervall der Änderung fehlt. Mit dem gleichen Argument – keine Prozessbetrachtung – kann diese Vorstellung auch als nicht passend zur Bilanzierung betrachtet werden.

In der Thermodynamik wird die Energie eines Körpers, der sich in seinem Ruhesystem nicht bewegt und dessen Zustand durch äußere Felder erst einmal nicht verändert werden soll, als *innere Energie*  $U$  bezeichnet. Insbesondere gehört auch die chemische Energie zur inneren Energie. Zerlegt man den Körper gedanklich in submikroskopische Körper (oder allgemeiner in Teilsysteme), auch Teilchen genannt, so lässt sich die innere Energie weiter zerlegen: In die Energie der Teilchen in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern d. h. in deren Translationen, Mit anschauliche mechanische Bild erfährt durch die Quantenphysik erhebliche Erweiterungen, die aber aus der Perspektive der Schulphysik nicht zwingend diskutiert werden müssen. Die translatorischen submikroskopischen Bewegungen bestimmen die *Temperatur* des Körpers. Daher

können sie auch als thermische Bewegungen bezeichnet werden. Mit dieser vereinfachten mechanischen Vorstellung ließe sich die damit zugeordnete Energie auch als *thermische Energie* bezeichnen. In speziellen Fällen (insbesondere beim idealen Gas) ist diese thermische Energie mit der inneren Energie identisch; in der Regel umfasst die innere Energie aber auch die potenziellen Energien zwischen den Teilchen.

Entscheidend bei der Energiebilanzierung sind die Systemgrenzen. Ein Beispiel: Bei einem Elektroauto (System 1), das mit konstanter Geschwindigkeit eine Auffahrt hinauffährt, nimmt die elektrochemische Energie des Akkumulators ab, dafür nimmt die potentielle Energie zu; zudem steigt die (innere) thermische Energie des Elektromotors und der Batterie an, der sich erwärmt. Die Gesamtenergie des Autos ändert sich durch den Kontakt mit den umgebenden Systemen, zum einem der Umgebungsluft und zum anderen dem Straßenbelag. Sowohl in die Luft (Kühlung) als auch in die Straße (Rollreibung) fließt Energie ab. Legt man die Systemgrenzen so fest, dass Rampe und umgebendes Luftvolumen einbezogen sind (System 2), bleibt die Energie dieses Systems erhalten.

### ■ Beschreibung von Energieänderungen mit Prozessgrößen

Im Kern beruht die physikalische Beschreibung von thermischen Phänomenen auf zwei Systemen mit unterschiedlichen Temperaturen. Die Energie im obigen Beispiel fließt in die Luft, weil der Körper Motor in der Regel wärmer ist als der Körper (Umgebungs-)Luft, oder physikalisch gesprochen eine höhere Temperatur als die Luft hat. Die Energie geht von selbst von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur über. Dieser Prozess kann sprachlich auf vielerlei Weisen charakterisiert werden: thermische Energieänderung, thermischer Energiestrom, thermischer Energiefluss oder einfach als Energie, die aufgrund einer Temperaturdifferenz fließt. Auch wird der Terminus *Wärmefluss* verwendet und von Wärmezufuhr oder kurz *Wärme* gesprochen.<sup>2</sup> Dies ist semantisch und physikalisch problematisch. Semantisch, weil der Alltagsbegriff ‚Wärme‘ zum einen Bezüge zur Temperatur aufweist, zum anderen aber auch zur Entropie. Physikalisch ist der Charakter der Wärme als eine *Prozessgröße* zu beachten: Es gibt wie oben gesagt Systeme, denen Wärme zugeführt wird, ohne dass diese Energie nach dem Prozess vollständig als thermische Energie im System enthalten ist. Betrachten wir z. B. einen Gasbehälter in der Erdatmosphäre, der sein Volumen ändern kann, und erwärmt wird. Die Bilanz des zugeführten Energieflusses stimmt nicht mit der Bilanz des Energieinhaltes überein. Energie ist also wieder hinausgeflossen. In der Sprache der Prozessgrößen: Es muss einen weiteren Energiefluss geben.

---

<sup>2</sup> In älteren Physikbüchern für Schule und Studium wird der Begriff „Wärmemenge“ verwendet. Er wird – auch im Physikunterricht – immer weniger verwendet, sodass wir in hier nicht mehr diskutieren. Nur cursorisch: Der Begriff ist problematisch, weil er suggeriert, dass die Wärme generell eine mengenartige Erhaltungsgröße sei. Dies wäre eine falsche Schlussfolgerung. Auch aus fachlich-didaktischer Sicht lässt sich einfach von *thermischer Energie* sprechen.

Die andere Möglichkeit, die Energie eines Systems zu ändern, ist in traditioneller Sprache die Verrichtung einer *Arbeit*  $W$ . Die Arbeit als Prozessgröße erlaubt wie bei der Prozessgröße Wärme Aussagen über Energieänderungen, nicht aber über die Speicherung der Energie. Zieht man z. B. einen Holzklotz mit einer konstanten Geschwindigkeit über eine Oberfläche, so wird am Klotz Arbeit verrichtet: Der Holzklotz nimmt Energie auf, gleichzeitig gibt der Holzklotz durch die Reibung einen Teil der Energie direkt an die Umgebung ab – über die Prozessgröße Wärme. Die Arbeit ist also nicht im Klotz „enthalten“.<sup>3</sup>

In der fachdidaktischen Literatur gibt es seit langer Zeit Diskussionen um den Umgang mit Prozessgrößen wie Wärme und Arbeit. Es gibt Positionen, die den völligen Verzicht von Prozessgrößen vorschlagen und andere, die genau das Gegenteil empfehlen. Das spielt bei den Unterrichtskonzeptionen z. T. eine große Rolle und wird in den entsprechenden Abschnitten dieses Kapitels diskutiert.

### ■ Energieerhaltung: Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Bezeichnen wir die thermische Energieänderung mit  $Q$  und fassen die übrigen möglichen Energieänderungen durch eine verallgemeinerte Arbeit in der Größe  $W$  zusammen, so erhält man eine Formulierung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik oder des Satzes von der Erhaltung der Energie, die in der Physik verbreitet ist (Gl. [A.2]):

$$\Delta E_{\text{ges}} = Q + W \quad \text{[A.2]}$$

Die (Gesamt-)Energie kennzeichnet den jeweiligen *Zustand* eines Systems; Wärme und Arbeit beziehen sich auf die *Prozesse* der Energieänderung. Es ist dabei wichtig, die Systemgrenzen festzulegen. Nur in einem vollkommen isolierten System ändert sich die Gesamtenergie nicht. Nimmt in einem bestimmten System die Energie zu, muss dafür in einem anderen System die Energie abnehmen. Es gibt keine Maschine, die funktioniert, also physikalisch Arbeit verrichtet (bzw. Energie abgibt), ohne dass sie ihrer Umgebung Energie entzieht, d. h. es gibt kein *Perpetuum mobile* erster Art<sup>5</sup>.

Wenn man nur die Änderungen der inneren Energie betrachtet (Formelzeichen  $U$ ), schreibt man den ersten Hauptsatz in der Form  $\Delta U = Q + W$ . Die Energie eines Körpers soll sich dabei nur auf zwei Arten ändern: indem er erwärmt wird oder zusammengedrückt bzw. auseinandergezogen; d. h. am Körper wird Arbeit verrichtet. Im Fall eines Gases kann sich der Körper bei Erwärmung ausdehnen. Der Körper verrichtet dann Arbeit an der Umgebung. Dies lässt sich auch einfacher sagen: Aufgrund einer Temperaturdifferenz nimmt der Körper Energie auf. Verändert

---

<sup>3</sup> Die Sache ist leider komplizierter: Verrichtet man an einem Körper in einem konstanten Schwerfeld Arbeit, indem man den Körper nach oben hebt, so ist die verrichtete Arbeit so groß wie die Änderung der potenziellen Energie. Die Prozessgröße Arbeit rückt damit in die begriffliche Nähe einer Speicherform.

<sup>4</sup> Streng genommen ist Gl. [2] eine Bilanzierungsvorschrift unter der Annahme der Konstanz der Gesamtenergie.

<sup>5</sup> Ein Perpetuum mobile zweiter Art würde den zweiten Hauptsatz verletzen.

der Körper bei diesem Prozess sein Volumen, so trägt dieser Prozess zur Energiebilanz bei: Energie kann auf diese Weise gleichzeitig wieder vom System abgegeben werden.

Die Gesamtenergie eines Systems ändert sich also durch die unterschiedlichen Energieflüsse, dargestellt über die Wärme  $Q$  und die (allgemeine) Arbeit  $W$ . Zur Erinnerung: Die (Gesamt-)Energie kennzeichnet den jeweiligen *Zustand* des Systems; die Energieflüsse Wärme und Arbeit beziehen sich auf die *Prozesse* der Energieänderung. Gleichung [A.2] kann folgendermaßen gelesen werden: Um die Energieänderung eines Systems zu beschreiben, sind erstens die beteiligten Energieflüsse zu identifizieren und zweitens zu bilanzieren. Dies lässt sich mit den mengenartigen mentalen Modellen auch anders sagen: Die Energie fließt von einem System zu einem anderen. Und noch einmal anders gesagt: Nimmt in einem bestimmten System die Energie zu, muss dafür in einem anderen System die Energie abnehmen.

Der zentrale Inhalt des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik lässt sich somit auf verschiedene Weisen ausdrücken:

- Bei allen in der Natur stattfindenden Vorgängen bleibt die Gesamtenergie erhalten.
- Innerhalb eines isolierten Systems bleibt die Energie erhalten.
- Die Energie eines abgegrenzten (geschlossenen) Systems ändert sich durch Wärme und Arbeit über die Systemgrenzen. Oder alternativ formuliert: sie ändert sich nur, wenn Energie hinein oder heraus fließt.
- Es gibt keine Maschine, die funktioniert, also physikalisch Arbeit verrichtet (oder Energie abgibt), ohne dass sie ihrer Umgebung Energie entzieht. D. h. es gibt kein *perpetuum mobile* erster Art.

## Entropie und Energieentwertung

### ■ Qualität von Energieformen, Energieentwertung, Dissipation

Nach dem ersten Hauptsatz bleibt in einem isolierten System die Gesamtenergie bei allen Prozessen im System erhalten. Es kann sich jedoch der „Energimix“ (Gl. [A.1]) ändern, die Energie kann in unterschiedlichen Speicherformen enthalten sein. Wenn das Elektroauto aus einem unserer vorherigen Beispiele die Rampe hochgefahren ist, hat die thermische Energie zugenommen (Erwärmung von Elektromotor, Batterie und Umgebungsluft; die Ausdehnung der Umgebungsluft sei vernachlässigt); dies geschieht zulasten der elektrochemischen Energie des Akkus. Beim Herabrollen kann man unter Nutzung der potenziellen Energie einen Generator antreiben. Im Falle ideal gedachter Generatoren und Akkumulatoren ließe sich dadurch der Akku wieder mit dem Betrag der potenziellen Energie aufladen. Es gibt jedoch keinen physikalisch denkbaren Prozess, durch den man die beim Herauffahren gestiegene thermische Energie des Motors und der Luft ebenfalls wieder vollständig in elektrochemische Energie wandeln könnte. Wäre diese möglich, müsste man den Akku nur ein einziges Mal laden. Möglich ist es aber, eine Wärmekraftmaschine, die einen Elektromotor antreibt, einzusetzen, um *einen Teil* der im

obigen Beispiel vorliegenden thermischen Energie nutzbar zu machen und den Akku zu laden. Damit würde das Elektroauto jedoch nicht wieder auf die gleiche Höhe hinauffahren können. Je nachdem wie die Wärmekraftmaschine gebaut wird, kann viel oder wenig thermische Energie wieder in elektrochemische Energie überführt werden. Die Erfahrung zeigt, dass aber keine vollständige Umkehrung des Prozesses erfolgt, auch nicht mit anderen Geräten.

Die Erfahrung zeigt also, dass es viele Prozesse gibt, deren Energieänderungen man nicht vollständig umkehren kann. Niemand hat z. B. beobachtet, wie sich Wasser in einem Behälter von allein erwärmt und die Umgebung des Behälters kälter wird. Die meisten Prozesse auf der Erde, die wir wahrnehmen, sind irreversible Prozesse. Wenn ein System bei irreversiblen Prozessen Energie verliert, d. h. die Umgebung wird erwärmt, kann diese abgegebene Energie nicht mehr vollständig in die vorher bestehenden Speicherformen des Systems rücktransferiert werden. Man spricht auch von der Dissipation der Energie.

Es ist daher bis zu einem gewissen Grad möglich, die Irreversibilität von Prozessen über die Dissipation von Energie zu charakterisieren. Aus der Erfahrung, dass mit Wärmekraftmaschinen nur ein bestimmter Anteil der thermischen Energie für Arbeit genutzt werden kann, kann man der thermischen Energie eine geringere *Qualität* zumessen (auch geringerer *Wert* genannt) als anderen Energieformen. Thermische Energie ist umso effizienter für das Verrichten von Arbeit nutzbar, je höher die Temperatur ist, auf der sie im Vergleich zur Umgebungstemperatur vorliegt. Mechanische Energieformen lassen sich dagegen im Prinzip vollständig untereinander wandeln. Zumindest erlaubt die Mathematik der klassischen Mechanik eine Mechanik mit ausschließlich reversiblen Prozessen. Dadurch wird der mechanischen Energie eine höhere Qualität (oder einen höheren Wert) als der thermischen Energie zugeschrieben. In diesem Sinn kann dann auch von einer Energieentwertung gesprochen werden.<sup>6</sup>

## ■ Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen sind periodisch laufende Maschinen, z. B. Verbrennungsmotoren oder Heißluftmotoren, bei denen in der Regel ein Gas erwärmt wird; ihm wird Energie auf thermischem Wege zugeführt. Das Gas dehnt sich aus; dabei wird mit einem Teil der Energie ein fester Körper (z. B. ein Kolben) bewegt, der eine Kraft ausüben und andere Maschinen, z. B. einen Generator, antreiben kann: das Gas verrichtet Arbeit (anders formuliert: Energie fließt auf einem mechanischen Wege aus dem Gas in einen Generator). Dann wird das Gas wieder abgekühlt – es zieht sich zusammen; oder es wird durch neues kaltes Gas ersetzt.

---

<sup>6</sup> zur Qualität der Energie s. Müller (2014, S. 242ff).

Die begriffliche Konstruktion der „Qualität der Energie“ wird überflüssig, wenn die Entropie (s. nächster Absatz) einbezogen wird: Bei irreversiblen Prozessen wird Entropie – in der Regel bei Temperaturen größer als Null – erzeugt. Die Menge an erzeugter Entropie charakterisiert dann die Irreversibilität der Prozesse. Mit der erzeugten Entropie ist immer eine bestimmte Menge Energie verbunden (s. nächster Absatz). In vielen Fällen ist dies die dissipierte Energie, aber nicht in allen.



Für den Betrieb einer Wärmekraftmaschine benötigt man als Prinzip ein wärmeres ( $T_{hoch}$ ) und ein kühleres Reservoir ( $T_{niedrig}$ ) bzw. Heizung und Kühlung. Der Teil der Energie, der nicht über die Arbeit dem Gas entnommen wird, wird mittels Wärme (oder mittels Wärmefluss) dem kühleren Reservoir zugeführt. Der physikalisch maximale Wirkungsgrad einer idealen Wärmekraftmaschine (Carnot-Maschine) hängt nur von den Temperaturen (in Kelvin) der beiden Reservoirs ab:

$$\eta = \frac{\text{mechanisch maximal nutzbare Energie } W}{\text{thermisch zugeführte Energie } Q} = 1 - \frac{T_{niedrig}}{T_{hoch}} \quad [\text{A.3}]$$

Auch eine ideale Wärmekraftmaschine hat einen begrenzten Wirkungsgrad kleiner als 1 (Gl. [A.3]), weil auf der Erde und auch im Universum dauerhaft kein Körper oder kein Raumgebiet mit der Temperatur  $T_{niedrig} = 0$  Kelvin existiert oder sich herstellen lässt. (Näherungsweise erreicht man in Laborsituationen inzwischen die Größenordnung von milliardstel Kelvin.) Darüber hinaus ist es eine technische Frage, welcher Anteil des idealen Wirkungsgrades mit einer realen Maschine ausgeschöpft werden kann. Moderne Kohlekraftwerke erreichen Netto-Wirkungsgrade bis zu 45% (bezogen auf die elektrische Leistung). Sie schöpfen damit ca. zwei Drittel des aufgrund der im Prozess auftretenden unteren und oberen Temperaturen physikalisch möglichen Wirkungsgrades aus.

## ■ Entropie und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Warum ist es nicht möglich, die einer Wärmekraftmaschine (WKM) thermische zugeführte Energie vollständig in mechanische Energie umzusetzen? Dies lässt sich mit der Einführung einer weiteren physikalischen Größe begründen, der *Entropie*  $S$ : Wenn sich die Energie eines Körpers aufgrund einer Temperaturdifferenz ändert, ändert sich auch eine weitere Größe, die Entropie. Das heißt auch: Die Änderung seiner Energie mit der Wärme  $Q$  ist immer mit einer Änderung der Entropie der beiden Systeme verbunden.<sup>7</sup> Dabei kann die Gesamtentropie prinzipiell gleichbleiben oder aber zunehmen: Die Entropie ist also keine Erhaltungsgröße. Gleichung [A.4] zeigt den Zusammenhang zwischen einer (kleinen) Entropiezunahme bei (kleiner) Energiezufuhr:

$$\Delta S = \frac{1}{T} \cdot Q \quad \text{bzw.} \quad Q = T \cdot \Delta S \quad [\text{A.4}]$$

Die Gleichung gilt nur für *reversible* Prozessführungen, d. h. für Prozesse, bei denen keine weitere Entropie in einem System selbst oder durch den Energiestrom erzeugt wird. Eine Entropiezunahme erfolgt insbesondere durch jede Art von Reibung, aber auch durch einen Entropiefluss selbst.

---

<sup>7</sup> Strunk (2015) bezieht das Konzept „Wärme“ daher nicht allein auf den thermischen Energiefluss, sondern assoziiert damit gleichzeitig einen Entropiefluss. Man kann damit auch sagen, die Entropie fließt vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur.

Näherungsweise reversibel laufen thermische Prozesse bei geringen Temperaturdifferenzen ab oder auch bei extrem langsamen Prozessführungen: Zieht man die Schnur eines schwingenden Pendels schnell durch zwei Finger, so ist eine starke Erwärmung zu spüren, und das Pendel kommt zur Ruhe. Wird die Schnur langsam gezogen, wird kaum eine Erwärmung spürbar und das Pendel schwingt schneller. Beim schnellen Ziehen wird Entropie erzeugt, beim langsamen im Idealfall nicht.

Auf Basis der Entropie lässt sich der zweite Hauptsatz der Thermodynamik folgendermaßen formulieren: „Die in der Natur stattfindenden Vorgänge laufen so ab, dass dabei Entropie höchstens erzeugt, niemals aber vernichtet werden kann“<sup>8</sup>. Die Entropie eines Systems *kann abnehmen*, aber nur „wenn diese (...) gemeinsam mit Energie *an ein anderes System abgegeben wird*“<sup>9</sup>.

Wir zeigen an einem einfachen Beispiel, wie Entropieerzeugung und irreversible Prozesse zusammenhängen: Man verbinde zwei Eisenblöcke A und B mit unterschiedlichen konstanten Temperaturen  $T_A > T_B$  durch eine thermisch leitfähige Verbindung. Aufgrund des Temperaturunterschieds fließt Energie vom wärmeren in den kälteren Block. In der Energiebilanz entspricht die Energiezunahme von Block B der Energieabnahme von Block A. Die Entropiebilanz ist jedoch nicht ausgeglichen. Da die Energieabgabe von Block A zu jedem Zeitpunkt auf einer höheren Temperatur erfolgt als die Energieaufnahme von Block B, nimmt die Entropie von B stärker zu als die Entropie von A abnimmt:

$$\Delta S_A = \frac{1}{T_A} \cdot Q_A \quad ; \quad \Delta S_B = \frac{1}{T_B} \cdot Q_B$$

$$\text{mit } Q_B = Q_A \quad \text{ergibt sich} \quad \Delta S_B \geq \Delta S_A$$

Fließen 1000 J aus Körper A bei einer Temperatur von 1000 K so fließt auch eine Entropie von 1 J/K heraus. In Körper B fließen 1000 J (die Energie bleibt ja erhalten) bei z. B. 500 K: Hier fließt eine Entropie von 2 J/K. Die Entropie hat um 1 J/K zugenommen. Prozesse, bei denen die Entropie zunimmt, werden irreversibel genannt. Sie können nicht ohne einen anderen äußeren Antrieb rückwärts verlaufen: Man wird also nach dem bisherigen Stand der Physik nie beobachten, dass zwei Körper gleicher Temperatur aufgrund eines thermischen Kontakts von alleine einen Temperaturunterschied ausbilden. Dieses Beispiel hatten wir ja schon benutzt.

Betrachten wir mit diesem Wissen noch einmal die *Wärmekraftmaschine*. In eine *Wärmekraftmaschine* fließen aus einem Reservoir A ( $T_{\text{hoch}}$ ) also Energie *und* Entropie. Würde die gesamte Energie über die mechanischen Bewegungen oder eben über die Arbeit aus der WKM herausfließen, verbliebe die Entropie ganz in der WKM und würde immer weiter zunehmen, da ja mit der Energie aus Reservoir A weiter Entropie zufließt. Die Kühlung der WKM über das kältere Reservoir B verhindert eine Art „Entropieverstopfung“. Die Funktion des Kühlkreislaufs

---

<sup>8</sup> Müller (2014, S. 274)

<sup>9</sup> Strunk (2015, S. 57; Hervorhebung im Original)

besteht also i. W. in der Abführung von Entropie. Eine WKM, die man nicht kühlt, d. h. bei der keine Energie thermisch abfließt, bleibt nach gewisser Zeit stehen. Dies erklärt, warum eine vollständige Umsetzung der thermisch zugeführten Energie in mechanische Energie bei einer WKM nicht möglich ist. Je niedriger die Temperatur von Reservoir B bei gleichbleibender Temperatur von Reservoir A, desto höher der Wirkungsgrad einer WKM; dies folgt aus Gl. [A.3].

Wir können jetzt die Entwertung der Energie auch mit der Entropie verstehen. Bei irreversiblen Prozessen wird Entropie erzeugt. Diese fließt mit einer bestimmten Energie aus dem System. Soll z. B. mit einer WKM diese thermische Energie wieder zu mechanischer Energie werden – dies ist ja möglich, die thermische Energie ist im Alltagskonzept Nutzen ja nutzbar –, muss die Entropie aus der WKM fließen. Damit fließt auch immer ein Rest Energie aus dem System. Die Entwertung der Energie bei einem Prozess ist also gleichbedeutend mit der Erzeugung von Entropie.

Auf Basis der Entropie lässt sich der zweite Hauptsatz der Thermodynamik z.B. folgendermaßen formulieren:

- „Die in der Natur stattfindenden Vorgänge laufen so ab, dass dabei Entropie höchstens erzeugt, niemals aber vernichtet werden kann.“ Müller (2014, S. 274)

Die Entropie eines Systems *kann abnehmen*, aber nur:

- „wenn diese (...) gemeinsam mit Energie *an ein anderes System abgegeben wird*. (Strunk, 2015, S. 57; Hervorhebung im Original)

In der hier verwendeten Darstellung wird die Entropie als eine mengenartige extensive Größe behandelt. In der statistischen Physik wird die Entropie auch zu einem Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein System einen bestimmten Zustand einnimmt. Wir skizzieren diesen Gedanken nur grob: Sieht man von der Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle ab – was eigentlich bei der statistischen Berechnung der Entropie nicht zulässig ist –, so ist es ist z. B. extrem unwahrscheinlich, dass sich nahezu alle Moleküle eines Gases gerade in der einen Hälfte eines Behälters befinden (geringe Wahrscheinlichkeit, d. h. geringe Entropie). Viel wahrscheinlicher sind Konfigurationen, bei denen die Teilchen sich in etwa gleich auf beide Hälften verteilen (hohe Wahrscheinlichkeit, d. h. höhere Entropie). Dieser Ansatz lässt sich weiter ausbauen. Ist ein physikalisches System aus mehreren identischen Teilsystemen aufgebaut, so lässt sich im thermischen Gleichgewicht kurz gesagt die Entropie  $S$  des Systems über  $S = -k \sum p_i \ln p_i$  berechnen.  $k$  ist die Boltzmannkonstante,  $p_i$  bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, ein Teilsystem im Zustand  $i$  mit dem Energieeigenwert  $E_i$  zu finden. Die Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  lassen sich auch über den Boltzmann-Faktor mit dem Energieeigenwert  $E_i$  der Teilsysteme berechnen.

## Zusammenfassung der fachlichen Aspekte des Energiebegriffs

Duit (1986, 95ff.) hat neben der Konzeptualisierung der Energie vier grundlegende Aspekte des Energiebegriffs formuliert, die wir für eine Zusammenfassung der fachlichen Einordnung nutzen:

- **Konzeptualisierung der Energie**  
Abstrakte Bilanzierungsgröße, deren Wert sich aus einer Energiefunktion berechnet, oder mengenartige Größe, über die man wie über etwas Stoffliches sprechen kann, ohne dass dieses Stoffliche eine Masse hat, daher ist auch die Rede von einer Quasi-Substanz.
- **Energietransport**  
Austausch von Energie zwischen Systemen; Fluss von Energie über Systemgrenzen, Energieströme und Energiestromstärken als integrierte Energiestromdichten.
- **Energieumwandlung**  
Energie bleibt Energie; sowohl die Energie eines Systems und als auch seine Energieänderungen können unter bestimmten Bedingungen in verschiedene Anteile zerlegt werden; man spricht von Speicher- und Transportformen.
- **Energieerhaltung**  
In einem abgeschlossenen System bleibt der Wert der Energie gleich; gibt ein System Energie ab, so wird genau diese Menge an Energie von einem oder mehreren anderen Systemen aufgenommen.
- **Energieentwertung**  
Bewertung der Energieformen bei Prozessen; die Erzeugung von Entropie führt zu einem Abfluss von Energie, der nicht vollständig zurückgeführt werden kann

### Literatur zur Vertiefung

Chen, R. F., Eisenkraft, A., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K., Nordine, J. C. & Scheff, A. (2014). Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education. Switzerland: Springer.

Der Sammelband gibt in 20 Beiträgen einen breiten Überblick über den fachdidaktischen Forschungsstand und Unterrichtsansätze zum Thema Energie. Zu den behandelten Aspekten zählen Schülervorstellungen, Unterrichtsziele, fachliche Fragen der Elementarisierung und Unterrichtsvorschläge.

Duit, R. (1986). Der Energiebegriff im Physikunterricht. Kiel: IPN.

Die Habilitationsschrift von Duit gilt als Standardwerk zum Energiebegriff. Ausgehend von einer umfassenden fachlichen Analyse des Konzepts behandelt das Buch angemessene Konzeptualisierungen für den Unterricht, Studien zu Schülervorstellungen und unterrichtliche Konsequenzen.

Müller, R. (2014). Thermodynamik. Vom Tautropfen zum Solarkraftwerk. Berlin: de Gruyter.

Müller hat ein Fachbuch geschrieben, das anhand von Kontexten, die auch für den Unterricht geeignet sind, die Thermodynamik auf Universitätsniveau entwickelt.

Strunk, C. (2015). Moderne Thermodynamik - von einfachen Systemen zu Nanostrukturen. Berlin: de Gruyter.

Strunk zeigt, wie die Thermodynamik als konsistente Grundlage für die Experimentalphysik bis hin zur Quantenphysik verstanden werden kann. Die Kapitel 1 bis 4 vermitteln Lehramtsstudierenden und Lehrkräften wichtige Grundlagen der Thermodynamik.

## Text B

# Fachliche Vertiefungen zu Energie und Energieentwertung in der Unterrichtskonzeption von Backhaus und Schlichting

**Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.3 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum\***

<https://www.springer.com/de/book/9783662630525>

*Erich Starauschek und Horst Schecker*

Backhaus und Schlichting kritisierten bereits 1981 die randständige Behandlung der Entropie und der Energieentwertung im Vergleich zur Betonung der Energieerhaltung im Physikunterricht.<sup>10</sup> 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 Entropie als Zustandsgröße formal eingeführt werde, ohne dafür eine phänomenologische Basis durch Beobachtungen von Vorgängen zu schaffen. Zudem sei die Veranschaulichung der Entropie mit Hilfe von Ordnungsvorstellungen problematisch, weil für die Präzisierung von „Ordnung“ der Entropiebegriff selbst erforderlich.<sup>11</sup>

Ausgehend von einer fachlich-fachdidaktischen Analyse haben Backhaus und Schlichting eine Unterrichtskonzeption entwickelt, die den zweiten Hauptsatz in das Energiekonzept integriert.<sup>12</sup>

---

\* Für alle weiteren Ausführungen, insbesondere zu den damit verbundenen Unterrichtskonzeptionen mit den Darstellungen der jeweiligen Unterrichtsgänge verweisen wir auf das vollständige Kapitel im Lehrbuch. Die hier vorgelegten erweiterten Texte werden verantwortet von Erich Starauschek und Horst Schecker. Sie ersetzen nicht das Buchkapitel und sind nicht als Teil des Buches zitierfähig.

Stattdessen ist als Zitat zu verwenden: Starauschek, E. & Schecker, H. (2021). Fachliche Vertiefungen zu Energie und Energieentwertung in der Unterrichtskonzeption von Backhaus und Schlichting – Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.3 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum;

Retrieved from <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>

<sup>10</sup> Backhaus & Schlichting, 1981

<sup>11</sup> Backhaus (1982, S. 2)

<sup>12</sup> 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, 30ff.); Bredthauer (2011, 84 f.)

Dabei gehen sie von der Phänomenklasse der irreversiblen Prozesse aus, bei denen Energie dissipiert bzw. entwertet wird, und daher nicht ohne weiteres vollständig in eine andere Energieform zurück gewandelt werden kann. Die Konzeption wird in „Energie und Energieentwertung – Arbeitsbuch für Schüler der Sekundarstufen I und II“<sup>13</sup> als konsistenter theoretischer Gedankengang entwickelt. Die folgende Darstellung orientiert sich am „Arbeitsbuch“. An einigen Stellen ist ergänzendes Material aus Zeitschriftenveröffentlichungen eingearbeitet.

Die ursprüngliche Kritik trifft nach wie vor zu. Die Erhaltung als Kern des physikalischen Energiebegriffs passt ohne physikalisches Hintergrundwissen nicht zu gesellschaftlich-ökonomischen Notwendigkeiten einer von Alltagsvorstellungen geprägten Problematik der Energieversorgung und Energieeinsparung. Identische Termini werden in Alltags- und Fachsprache unterschiedlich benutzt, und haben daher nicht dieselbe Bedeutung. Backhaus und Schlichting legen letztendlich einen der ersten stoffdidaktischen Ansätze für die Physik vor, der von der physikalischen Größe Energie ausgeht und Prozesse unter dem Primat der Energie als Energieumwandlungen beschreibt.

## ■ 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 ist eine Art „allgemeine Potenzialität“, Prozesse in Gang zu setzen. 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 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“

---

<sup>13</sup> Schlichting (1983)

werden. Für das Rückspulen unumkehrbarer Prozesse muss aber ein anderer Prozess ablaufen, z. B. das Erhitzen durch einen Tauchsieder. Für diesen Prozess ist wieder Energie notwendig. In der Energieformensprache wird dabei elektrische in thermische Energie umgewandelt. Auch um andere Prozesse aufrecht zu erhalten, muss Energie zugeführt werden: Ohne einen Menschen, der zieht, oder ein Gewicht würde sich z. B. ein Dynamo nicht dauerhaft drehen. Einmal in Schwung gesetzt, würde er von sich aus zum Stillstand kommen

Um den Erhaltungsaspekt der Energie und die Irreversibilität von Prozessen didaktisch in einem Energiebegriff zu verbinden, wird die Energie bei Energieumwandlungen nicht verbraucht, sondern entwertet: „Ein Vorgang ist mit Energieentwertung verbunden, wenn aus dem Endzustand nicht ohne weiteres der Anfangszustand wieder hergestellt werden kann.“ (Schlichting, 1983, S. 31). Schlichting 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- in weniger wertvolles Spülwasser umgewandelt. Es kann wieder aufbereitet werden: ein Rückspulen. Neben der Entwertung kann also von einer Aufwertung sowohl des Wassers als auch der Energie gesprochen werden.

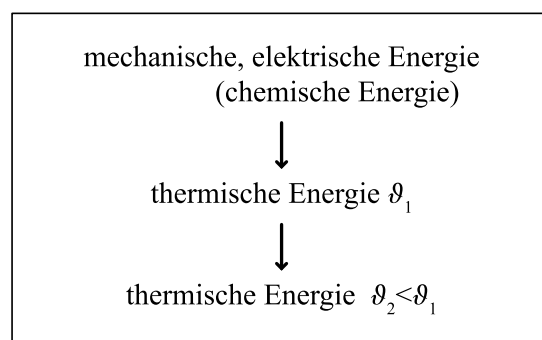
Dem Begriff des „Werts“ von Energie bzw. von Energiearten haftet zunächst eine subjektive, situationsbezogene Komponente an. Hierzu einige Beispiele: Die potentielle Energie eines Bergsteigers auf dem Gipfel ist für ihn weniger wertvoll als die thermische Energie des mitgeführten Kaffees, obwohl die beim Aufstieg gewonnene potentielle Energie rechnerisch reichen würde, um mehrere Kannen Kaffee zu kochen. Für einen Dynamo hingegen ist die potentielle Energie wertvoller, d. h. besser zu nutzen als die gleiche Menge thermischer Energie. Für den Betrieb eines Stirlingmotors ist das Wasserreservoir mit einer Temperatur von 100°C wertvoller als eines mit 35°C. Für ein Wannenbad hingegen hat Wasser der Temperatur 35°C für einen Menschen einen höheren Wert als eine Wannenfüllung mit 100°C.<sup>14</sup> Wenn man jedoch das Wasser von 100°C für das Wannenbad mit kaltem Wasser mischen kann, ist sein Wert höher als der einer Wannenfüllung mit 35°C (man könnte im Prinzip häufiger baden). Eine Menge an elektrischer Energie ist wiederum wertvoller als die gleiche Menge thermischer Energie von Wasser bei Raumtemperatur, denn man kann sie mit den entsprechenden und in unserer Lebenswelt leicht verfügbaren Geräten sowohl zum Heizen als auch zur Beleuchtung oder zur Fortbewegung (Elektromotor) benutzen. Es bedarf also eines definierten Kriteriums, um den Wert von Energieformen zu bestimmen. In der Konzeption von Backhaus und Schlichting ist „von zwei selbsttätigen Prozessen (die gegeneinander laufen, d. Verf.) ... derjenige mit der größeren Energieentwertung verbunden, der den anderen zurückspulen kann“ (Backhaus, 1998, S. 125).

---

<sup>14</sup> vgl. die Beispiele in Backhaus, 1998 (S. 121)



Im Arbeitsbuch werden verschiedene Beispiele für Prozesse der Entwertung oder Aufwertung beschrieben, z. B. die Erwärmung des Wassers eines Wasserfalls, das in ein Becken einfach heruntergefallen ist (Energieentwertung), im Unterschied beim Antreiben eines Generators, wodurch das hinabströmende 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 höherer Temperatur ist zudem wertvoller als thermische Energie auf niedrigerer Temperatur. Mit einem Reservoir der Anfangstemperatur 90 °C kann der Wärmefluss in die Kaffeetasse einen vorangegangenen Abkühlungsprozess von 50 °C auf Zimmertemperatur rückspulen. Das Reservoir muss nur groß genug sein. Mit 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 (s. Abbildung)



Rangfolge der Energiearten nach Schlichting und Backhaus (1984, S. 8)<sup>15</sup>

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

<sup>15</sup> Hier ist die chemische Energie – zumindest in Klammern – der mechanischen und elektrischen Energie gleichgestellt. Im Prinzip lassen sich viele chemische Reaktionen reversibel realisieren; damit ist eine Gleichstellung der chemischen Energie mit der mechanischen und elektrischen rechtfertigen. Oft laufen sie jedoch maximal irreversibel ab, d. h. es wird bei der chemischen Reaktion ein Maximum an Entropie erzeugt. Entstehen bei der chemischen Reaktion Gase, so kann ein Teil der Energie der chemischen Reaktion in mechanische Energie umgewandelt werden, da die entstehenden Gase einen Stempel in einem Kolben bewegen können. Dies rechtfertigt die Zwischenstellung der Energie. Offen ist im Konzept der Energieentwertung die Frage der taxonomischen Einordnung der elektrochemischen Energie z. B. bei Akkumulatoren.

werden.“<sup>16</sup> Prozesse laufen demnach ab, weil Energie entwertet werden kann, z. B. beim Abkühlen der Kaffeetasse. „Entwertung“ erlangt so eine positive Bedeutung, die durch gekoppelte Vorgänge erlangt wird: Erhält ein Prozess durch Entwertung von Energie den anderen aufrecht oder spult ihn zurück, so kann die „Entwertung“ bei einem Prozess als Antrieb für den zweiten Prozess aufgefasst werden. Im Abschnitt „Energiesysteme“ des Arbeitsbuchs wird ausgeführt, wie der Mensch sich über die Aufnahme und Entwertung hochwertiger chemischer Energie (z. B. Zucker und Sauerstoff) am Leben erhält und zu Bewegungen befähigt wird.

### ■ Exkurs Exergie

Die erzeugte Entropie scheint ein mögliches Maß für die Energieentwertung zu sein: Wertvolle elektrische Energie wird z. B. in thermische umgewandelt und damit entwertet – dabei entsteht Entropie. Bei manchen Aufwertungen gibt es jedoch Probleme: So ist die selbsttätige Erwärmung eines Körpers durch kernphysikalische Prozesse mit einer Aufwertung der thermischen Energie und mit der Erzeugung von Entropie verbunden, die ja eine Entwertung der thermischen Energie indizieren sollte. Will man eine im Sinne der Energieentwertung konsistente Begriffsbildung erreichen, so ist ein anderer Weg zu gehen<sup>17</sup>: Es wird der Teil der Energie bei einer Energieumwandlung betrachtet, der bei einem gegebenen Prozess maximal dissipiert werden kann, ohne den dabei ablaufenden irreversiblen Prozess der Erwärmung selbst – und damit der Entropieerzeugung – einzubeziehen. Diese physikalische Größe kommt überwiegend in der Technik vor und heißt Exergie: Sie ist die Energie eines Systems, die maximal in mechanische Energie umgesetzt werden kann (oder mit der die maximale Arbeit verrichtet werden kann). Die Exergie kann als numerisches Maß für die Entwertung gelten: Wird viel Exergie dissipiert, so ist die Entwertung groß, d. h. die übrig gebliebene Exergie ist klein, also weniger wertvoll. Eine Energieform wird hingegen aufgewertet, wenn die Exergie zunimmt.

Dies ist eine geeignete Stelle, die Unterschiede in den Konzepten Dissipation, Ent- und Aufwertung und Entropieerzeugung kurz anzudeuten. Es gibt reversible (und annähernd reversible) sowie irreversible Prozesse. Bei den reversiblen Prozessen wird keine Entropie erzeugt, keine Energie dissipiert und keine Energie entwertet. Alle irreversiblen Prozesse sind über die Erzeugung von Entropie charakterisiert. Die erzeugte Entropie kann als Maß für die Irreversibilität angesehen werden, da Prozesse auch so realisiert werden könnten, dass die Entropieerzeugung minimiert wird. Nicht alle irreversiblen Prozesse können mit dem Konzept der Dissipation erfasst werden. Bei irreversiblen Energieumwandlungen wird Entropie erzeugt, aus der sich die dissipierte Energie berechnen lässt. Entropieerzeugung, Energiedissipation und Entwertung führen dann zu denselben Aussagen. Bei einem Wärmefluss als irreversiblen Phänomen wird keine Energie dissipiert, aber Entropie erzeugt. Dieses Phänomen erzwingt gewissermaßen eine Erweiterung des Dissipationskonzepts. Das Entwertungskonzept der Energie hat auch hier Bestand. Das Entwertungskonzept der Energie betrachtet nur den Teil der Energie eines Systems

---

<sup>16</sup> Schlichting und Backhaus (1987, S. 15)

<sup>17</sup> Schlichting, 1983, 46ff.

das bei optimaler Prozessrealisierung maximal (im Vergleich zu anderen Prozessrealisierungen) in mechanische Energie umgesetzt werden kann (also in das bekannte Heben eines Massstücks im homogenen Gravitationsfeld). Dabei muss nicht zwangsläufig Energie dissipiert werden; die Exergie bleibt dann konstant.

Die Exergie der thermischen Energie ist immer kleiner als die thermische Energie selbst. Sie bezieht sich ja auf eine Umgebungstemperatur, d. h. die Temperatur der Umgebung limitiert die thermische Energie, die ein System höherer Temperatur abgeben kann.<sup>18</sup> Schlichting (1983, S. 47) verwendet die Termini „Wert der Energie“ und „Exergie“ synonym. Damit lässt sich aus technischer Perspektive das Sprechen von nützlicher Energie regeln: Die Energie, die bei selbsttätigen Prozessen von Geräten maximal in die wertvollen Energieformen umgesetzt werden kann. In der Schule werden diese expliziten Diskussionen eines Maßes für den Wert der Energie keine Rolle spielen. Sie machen aber verständlich, warum im Konzept von Backhaus und Schlichting die Nutzenergie und der exergetische Wirkungsgrad eine Rolle spielen. Die Exergie bringt eine prinzipielle Schwierigkeit mit sich: Sie hängt von der Umgebungstemperatur ab: Je kleiner die Umgebungstemperatur, desto größer die Exergie; denn die Umsetzung von thermischer in mechanische Energie mit einer Wärmekraftmaschine hängt von der Temperaturdifferenz System-Umgebung ab. Wir haben bislang nur an Prozesse ohne Volumenänderung gedacht. Werden z. B. Gase einbezogen, so spielt bei der Berechnung der Exergie auch der Druck der Umgebung eine Rolle.

### ■ Nutzenergie, Wirkungsgrad

Ein qualitatives Verständnis des Energiesparens besteht nach der Konzeption von Backhaus und Schlichting darin, Prozesse so zu realisieren, dass die Energie möglichst wenig entwertet wird und „Energieentwertungen zu größtmöglichen Energieaufwertungen zu nutzen. Dann nämlich ist der Verbrauch an Energie und die damit verbundene thermische Verschmutzung der Umwelt am kleinsten.“<sup>19</sup> Im Arbeitsbuch wird gezeigt, wie diese Definition des Energiesparens bei einer Elektroheizung zu Schwierigkeiten mit dem energetischen Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutzen und Aufwand führt. Da die gesamte elektrische Energie (Aufwand) zum Heizen verwendet wird (Nutzen), ist der Wirkungsgrad  $\eta = 1$ :

$$\eta = \frac{\text{Nutzenergie (zum Heizen)}}{\text{aufgewendete Energie}} \approx 1 \quad [\text{B.1}]$$

Das scheint für einen optimalen Prozess zu sprechen. Im Wirkungsgrad  $\eta$  kommt der Wertverlust der Energie (hochwertige elektrische Energie wird in weniger wertvolle thermische Energie umgewandelt) also nicht zum Ausdruck. Bei vollständiger Energiedissipation müsste ein Wirkungsgrad nahe bei null sein. Daher wird von Backhaus und Schlichting der *exergetische* Wirkungsgrads  $\eta^*$  eingeführt (Gl. [B.2]): als Quotient aus dem minimalen Aufwand von Energie,

---

<sup>18</sup> Backhaus & Schlichting, 1984

<sup>19</sup> Schlichting und Backhaus (1987, S. 17)

d. h. bei dem Prozess wird der keine Aufwertung realisiert, und dem tatsächlichen Aufwand bei optimaler Prozessführung – also der Prozessrealisierung mit maximaler Aufwertung:

$$\eta^* = \frac{\text{minimaler Aufwand}}{\text{tatsächlicher Aufwand}} \quad [\text{B.2}]$$

Der Aufwand bezieht sich also auf die Prozessrealisierung. 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 Grundwasser-Wärmepumpe betreiben, um den Raum zu beheizen. Wenn das Grundwasser eine Temperatur von 283 K hat und die Zimmertemperatur 293 K beträgt, ließe sich bei einer idealen Prozessführung mit 1 kWh elektrischer Energie 29,3 kWh thermische Energie gewinnen (→ Gl. [A.3] in Text A). Der geringe exergetische Wirkungsgrad von  $\eta^* = 0,03^{20}$  nach Gl. [B.2] drückt also gegenüber dem energetischen Wirkungsgrad von  $\eta = 1$  (Gl. [B.1]) die höchst ineffektive Prozessführung bei der Elektroheizung aus. Der inhaltliche Kern, zu dem die Überlegungen führen, ist einfacher zu formulieren: Für die mechanische und elektrische Energie als die wertvollsten Energieformen bedeutet also Energiesparen, die Temperaturdifferenz, die bei Umwandlung der thermischen Energie zwischen dem System und der Umgebung entsteht, durch Prozessrealisierung so zu nutzen, dass möglichst viel thermische Energie wieder in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt wird.

### Literatur zur Vertiefung

Als „Arbeitsbuch für Schüler der Sekundarstufen 1 und 2“ ist die Konzeption von der Energie über die Energieentwertung bis zur Exergie veröffentlicht in:

Schlichting, H. J. (1983). Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer

(<https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>)

Die theoretischen Grundlagen des Entropiebegriffs als Maß für die Irreversibilität von Prozessen und des Verständnisses der Energieentwertung sind ausgearbeitet in:

---

<sup>20</sup> Wird alle elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt, so steht maximal eine 1 kWh zur Verfügung, die prinzipiell in mechanische Energie (oder in Arbeit) umgesetzt werden kann: die Exergie, die mit minimalem Aufwand erreicht werden kann. Diese wird zu den 29,3 kWh in Relation gesetzt, die bei maximaler Energieaufwertung in mechanische Energie umgesetzt werden kann: die Exergie, die maximal erreicht werden kann. Man kann für den exergetischen Nutzungsgrad auch schreiben

$$\xi = \frac{\text{Exergie der genutzten Energie}}{\text{Exergie der aufgewendeten Energie}} .$$

Dann wird es vielleicht etwas klarer: Wie nutzt man die Energie (Zähler,) und welche Exergie ist damit verbunden, im Verhältnis zur maximalen erzielbaren Exergie (indem man die aufgewendete Energie in die maximal erreichbare mechanische Energie umsetzt.

Backhaus, U. (1982). *Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen* (Dissertation). Universität Osnabrück (in 2. Auflage erschienen 1998).

## Text C

# Mengenartige Größen, Energiestrom und Energieträger Fachliche Grundlagen zu Energie und Entropie als mengenartige Größen im Karlsruher Physikkurs

Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.4 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum\*

<https://www.springer.com/de/book/9783662630525>

*Erich Starauschek und Horst Schecker*

Der Karlsruher Physikkurs (KPK)<sup>21</sup> wurde an der Universität Karlsruhe als neuartige Darstellung physikalischer Strukturen für Schule und Hochschule insbesondere von Friedrich Herrmann ausgearbeitet. Der KPK geht anders als die traditionelle Physik von einer Struktur der allgemeinen Thermodynamik<sup>22</sup> aus, die aus einer physikalisch-fachlichen Perspektive lernpsychologische und lernökonomische Vorteile verspricht. 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 schreiben als (vgl. Gl. [A.1] in Text A):

$$dE = \xi_1 dX_1 + \xi_2 dX_2 + \dots + \xi_n dX_n \quad [\text{C.1}]$$

Die physikalischen Größen  $\xi_i$  sind die sogenannten *intensiven Größen*. Die physikalischen Größen  $X_i$  sind die sogenannten *extensiven Größen*. Zu jeder extensiven Größe  $X_i$  gehört nach Gl. [C.1] eine intensive Größe  $\xi_i$ . Man sagt, dass diese beiden Größen zueinander „energiekonjugiert“ sind. Die Energie  $E(X_1, X_2, \dots, X_n)$  und die  $\xi_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$  sind Funktionen der

---

\* Für alle weiteren Ausführungen, insbesondere zu den damit verbundenen Unterrichtskonzeptionen mit den Darstellungen der jeweiligen Unterrichtsgänge verweisen wir auf das vollständige Kapitel im Lehrbuch. Die hier vorgelegten erweiterten Texte werden verantwortet von Erich Starauschek und Horst Schecker. Sie ersetzen nicht das Buchkapitel und sind nicht als Teil des Buches zitierfähig. Stattdessen ist als Zitat zu verwenden: Starauschek, E. & Schecker, H. (2021). Mengenartige Größen, Energiestrom und Energieträger - Fachliche Grundlagen zu Energie und Entropie als mengenartige Größen im Karlsruher Physikkurs – Erweiterte Fassung von Teilen des Kap. 6.4 des Lehrbuchs Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) (2021): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Heidelberg: Springer-Spektrum; Retrieved from <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen>

<sup>21</sup> Herrmann et al. (2014)

<sup>22</sup> Falk (1968)

extensiven Variablen, und die intensiven Größen  $\zeta = \frac{\partial E}{\partial X}$  sind die partiellen Ableitungen der Energie. Aus Gl. [C.1] folgt direkt: Ändert sich eine der extensiven Größen  $X$ , so ändert sich auch die 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  $\varphi$ , 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 aber 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  $p$ . Zwei Körper mit gleichem Impuls und gleicher Geschwindigkeit werden gedanklich im Flug durch eine masselose Stange verbunden: Der Impuls des neuen Körpers setzt sich additiv aus den Impulsen der beiden Körper zusammen, die Geschwindigkeit bleibt konstant.

Der allgemeine Ausdruck aus Gl. [6] schreibt sich mit konkreten Größen als Gl. [C.2]:

$$dE = T dS - p dV + \varphi dQ + \vec{v} d\vec{p} + \dots \quad [\text{C.2}]$$

Aus Gl. [C.2] 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. Nach dieser Darstellung sollte die Wärmelehre auf den physikalischen Größen Entropie und Temperatur basieren. Für feste und flüssige Körper trägt diese Vereinfachung.
- 2) Einige extensive Größen lassen sich als mengenartige Größe konzeptualisieren. Ein Vorteil: Über mengenartige Größen kann 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. Wir zeigen an dem bekannten Beispiel der elektrischen Ladung, wie diese Analogie sprachlich funktioniert: Wie Wasser ist Ladung in oder auf einem Körper enthalten – allgemein in einem Raumgebiet. Die elektrische Ladung kann wie Wasser von einer zu einer anderen Stelle fließen, also insbesondere in ein Raumgebiet hinein oder heraus fließen. Es lassen sich sowohl ein Wasser- als auch ein elektrischer Strom denken und eine Wasserstromstärke  $I_V$  und eine elektrische Stromstärke  $I_Q$  definieren. Die elektrische Ladung wird hier sprachlich als Eigenschaft eines nach phänomenologischen Kriterien elektrisch geladenen Körpers konzeptualisiert, und nicht über Ladungsträger.

Sowohl die mengenartigen Größen als auch die Stromstärken sind vereinfacht gesagt additiv. Mathematisch gesehen gehorchen mengenartige Größen  $X$  lokal der Kontinuitätsgleichung

$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} = - \operatorname{div} \vec{J}_X$ , wenn sie Erhaltungsgrößen sind. Insbesondere ist also die Energie eine solche erhaltene mengenartige Größe, und damit lässt sich aus der Energiestromdichte ein Energiestrom konzeptualisieren.

Können mengenartige Größen in einem Raumgebiet entstehen oder verschwinden, so muss dies mit einem Veränderungsterm (Erzeugen oder Vernichten)  $\sigma_X$  berücksichtigt werden  $\frac{\partial \rho_X}{\partial t} = - \operatorname{div} \vec{J}_X + \sigma_X$ . Für mengenartige Größen lassen sich also immer eine Dichte und eine Stromdichte, sowie lokale Veränderungsrate definieren. Integriert man die lokale Kontinuitätsgleichung, so erhält man  $\frac{dX}{dt} = I_X + \Sigma_X$ .

Diese Begriffsbildungen ermöglichen es, an vorhandene mentale Modelle der Alltagsvorstellungen anzuknüpfen und Alltagssprache zu verwenden.

3) Aus Gl. [C.2] lässt sich mit  $\frac{dX}{dt} = I_X$  – es wird grob gesagt durch  $dt$  „geteilt“ – schreiben:

$$I_E = T I_S - p I_V + \varphi I_Q + \vec{v} \vec{I}_p \dots \quad [\text{C.3}]$$

Übersetzt in ein abstraktes mentales Modell bedeutet dies: Fließt bei einem Prozess ein Energiestrom in oder aus dem System, so ist dieser Energiestrom mit der Energiestromstärke  $I_E$  von mindestens einem oder von einer Reihe von Strömen mengenartiger Größen  $X$  mit den Stromstärken  $I_X$  begleitet. 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  $\varphi_2$  zu einem niedrigeren elektrischen Potenzial  $\varphi_1$ , so beträgt der Nettoenergiestrom  $I_E = \varphi_2 I_Q - \varphi_1 I_Q = U I_Q$ . Die intensiven Größen stellen damit ein Beladungsmaß der Energieträger eines Energiestroms dar. In unserem Fall: 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.

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-Antriebs-Konzept.

Verallgemeinert sind dissipative Ströme einer mengenartigen Größe  $\vec{J}_X$  in einer guten Näherung proportional zur Differenz der zugehörigen intensiven Größe  $\xi$ . Mathematisch schreibt man lokal  $\vec{J}_X = -\sigma_X \operatorname{grad} \xi$ .  $\sigma_X$ <sup>23</sup> kann als verallgemeinerte Leitfähigkeit für den Strom der mengenartigen Größe  $X$  interpretiert werden. Dissipativ bedeutet wie schon gesagt, dass Energie

---

<sup>23</sup> Nicht zu verwechseln mit dem lokalen Änderungsterm  $\sigma_X$ , der die gleiche Bezeichnung hat.



durch Reibungsprozesse verloren geht. Bei der Dissipation wird Entropie erzeugt. In der Karlsruher Konzeptualisierung fließt damit Energie mit der erzeugten Entropie aus einem System. Im eindimensionalen Fall lässt sich der Gradient in  $I_X = R^{-1} (\xi_2 - \xi_1)$  umformen. Die Differenz der intensiven Größen an zwei unterschiedlichen Stellen wird dann als Antrieb für den Strom einer mengenartigen Größe  $X$  mit der Stromstärke  $I_X$  angesehen. Aus der verallgemeinerten Leitfähigkeit und den geometrischen Eigenschaften wird der verallgemeinerte Widerstand  $R$  gebildet. Man erkennt für die elektrische Ladung  $X = Q$  und das elektrische Potenzial  $\xi = \varphi$  das Ohm'sche Gesetz. Analog ist eine Temperaturdifferenz der Antrieb für den Entropiestrom.

### **Literatur zur Vertiefung**

Der Karlsruher Physikkurs baut auf einer Neukonzeption der Wärmelehre auf Grundlage einer allgemeinen Thermodynamik für die Hochschullehre auf:

Falk, G. & Ruppel, W. (1976). Energie und Entropie. Berlin: Springer.

Das Lehrbuch von Strunk (2015) greift diese Ansätze auf:

Strunk, C. (2015). *Moderne Thermodynamik - von einfachen Systemen zu Nanostrukturen*. Berlin: de Gruyter

Die Wärmelehre als Entropielehre geht auf Georg Job zurück, der diese ebenfalls zuerst für die Hochschullehre der Physikalischen Chemie entwickelt hat:

Job, G. (1972). Neudarstellung der Wärmelehre. Frankfurt a.M.: Akademische Verlagsanstalt.

## Literatur

- Backhaus, U. (1982). *Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen* (Diss.). Osnabrück: Universität Osnabrück.
- Backhaus, U. (1998). *Die Entropie als Größe zur Beschreibung der Unumkehrbarkeit von Vorgängen* (2. Aufl.). Koblenz: Universität Koblenz-Landau, [www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/publicat/Dissertation.pdf](http://www.didaktik.physik.uni-duisburg-essen.de/~backhaus/publicat/Dissertation.pdf).
- Backhaus, U. & Schlichting, H. J. (1981). Die Unumkehrbarkeit natürlicher Vorgänge. Phänomenologie und Messung als Vorbereitung des Entropiebegriffs. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 34(3), 153-160, [https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich\\_physik/didaktik\\_physik/publikationen/unumkehrbarkeitvorgaenge.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/unumkehrbarkeitvorgaenge.pdf).
- Backhaus, U. & Schlichting, H. J. (1984). Entropie und Exergie: Zwei Größen zur Beschreibung von Irreversibilität und Energieentwertung. *Der Physikunterricht*, 18(3), 41-57.
- Bredthauer, W. (2011). *Impulse Physik Mittelstufe für Gymnasien*. Stuttgart: Klett.
- Duit, R. (1986). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Kiel: IPN.
- Falk, G. (1968). *Theoretische Physik, Band II*. Berlin: Springer.
- Falk, G. & Ruppel, W. (1976). *Energie und Entropie*. Berlin: Springer.
- Herrmann, F., Haas, K., Laukenmann, M., Mingirulli, L., Morawietz, P. & Schmalze, P. (2014). *Der Karlsruher Physikkurs*. [www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk\\_material.html](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk_material.html).
- Job, G. (1972). *Neudarstellung der Wärmelehre*. Frankfurt a.M.: Akademische Verlagsanstalt.
- Müller, R. (2014). *Thermodynamik. Vom Taupfoten zum Solarkraftwerk*. Berlin: de Gruyter.
- Schlichting, H. J. (1983). *Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Arbeitsbuch für Schüler der Sekundarstufen I und II*. Heidelberg: Quelle & Meyer.
- Schlichting, H. J. & Backhaus, U. (1980). Vom Wert der Energie. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie*(11), 377-381.
- Schlichting, H. J. & Backhaus, U. (1984). Energieverbrauch und Energieentwertung. *Der Physikunterricht*(3), 24-40.
- Schlichting, H. J. & Backhaus, U. (1987). Energieentwertung und der Antrieb von Vorgängen. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie*, 35(24), 15-24.
- Schweitzer, S., Kopte, U., Backhaus, U., Schlichting, H. J., Fösel, A., Boysen, G., . . . Wilke, H.-J. (2015). *Fokus Physik, Gymnasium 7-10, Niedersachsen G9*. Berlin: Cornelsen.
- Strunk, C. (2015). *Moderne Thermodynamik - Von einfachen Systemen zu Nanostrukturen*. Berlin: de Gruyter.