

Um sich einer präzisen Definition der Größe Energie anzunähern, soll zunächst noch einmal der zuvor erwähnte mechanische Energiebegriff aufgegriffen werden, jetzt aber mit Hilfe eines präziser formulierten Beispiels.

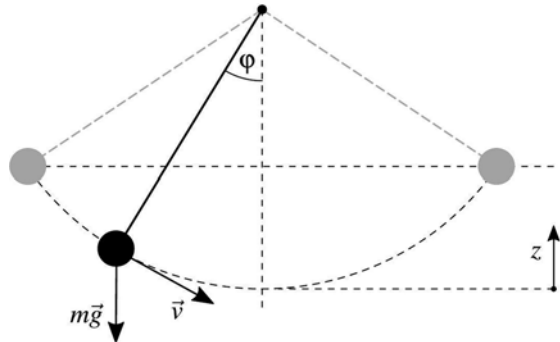
2.1 Der mechanische Energiebegriff

In Abb. 2.1 ist eine pendelnde Masse m gezeigt. In einer idealisierten Vorstellung ist die Masse in einem Punkt konzentriert (Punktmasse) und besitzt die erhöhte potentielle Energie mgz gegenüber dem Höhenniveau $z=0$ sowie die kinetische Energie $mv^2/2$, wobei v der Betrag des momentanen Geschwindigkeitsvektors \vec{v} ist. Da sich \vec{v} offensichtlich (zyklisch) ändert, muss eine Kraft auf die Masse m wirken, die ihren Impuls $m\vec{v}$ gemäß des 1. Newtonschen Axioms nur unter der Wirkung von angreifenden Kräften verändern kann. Diese Kraft ist offensichtlich die Gewichtskraft $m\vec{g}$, die immer dann eine von Null verschiedene Komponente in Richtung von \vec{v} besitzt, wenn der Winkel φ nicht Null ist.

Wenn außer der Gewichtskraft keine weiteren Kräfte wirken, bleibt die Pendelbewegung, einmal in Gang gesetzt, für alle Zeiten unverändert bestehen: Die mechanische Energie $m(gz + v^2/2)$ ist eine Konstante, wobei eine ständige zyklische Umwandlung zwischen der potentiellen und der kinetischen Energie stattfindet. Die mechanische Energie bleibt hier erhalten, die Gewichtskraft gehört deshalb in die Kategorie der sog. *konservativen Kräfte*. Dies sind aus mathematischer Sicht Kräfte, die ein Potential besitzen, aus dem ihr Wert durch eine Ortsableitung hervorgeht.

In der Realität geschieht aber erfahrungsgemäß etwas Anderes: Nach endlichen Zeiten kommt die Pendelbewegung zum Erliegen und die mechanische Energie ist „aufgebraucht“, da sowohl $z=0$ als auch $v=0$ gilt. Offensichtlich wirken weitere

Abb. 2.1 Idealisiertes Pendel unter der alleinigen Wirkung der Gewichtskraft



nicht-konservative Kräfte, wobei jetzt die Frage auftritt, welche Energieform in dem Maße angestiegen ist, in dem mechanische Energie „verbraucht“ wurde. Die klassische Mechanik kann diese Frage nicht abschließend beantworten, sondern zunächst nur die Abnahme der mechanischen Energie konstatieren.

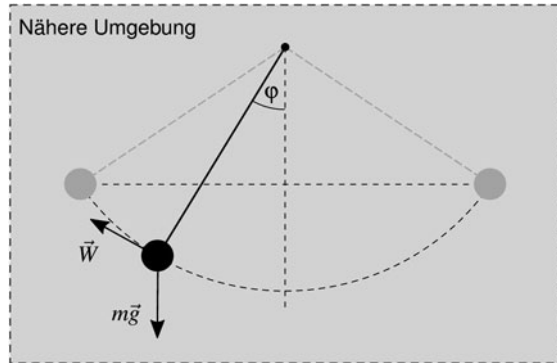
2.2 Die thermodynamische Erweiterung des Energiebegriffs

Für das unbegrenzt lange schwingende Pendel war die Gewichtskraft als einzig wirkende Kraft unterstellt worden. In der Realität kommen aber noch „Reibungskräfte“ hinzu, die offensichtlich die Gesamtsituation grundlegend verändern. Hierbei handelt es sich einerseits um Gleitreibungskräfte innerhalb der mechanischen Aufhängung des Pendels und andererseits um Reibungskräfte im Zusammenhang mit Luft-Widerstandskräften an der in ruhender Umgebung bewegten Masse.

Diese Reibungskräfte führen zu einem „Verbrauch“ mechanischer Energie. Gemäß dem Energieerhaltungsprinzip muss dafür in gleichem Maße eine andere Energieform „erzeugt“ werden. Eine in diesem Zusammenhang gelegentlich gegebene Erklärung besagt, dass mit dem Abklingen der Pendelbewegung „Wärme erzeugt“ würde. Diese Erklärung weist in die richtige Richtung, ist aber noch in mehrerlei Hinsicht unpräzise bis falsch.

Aus thermodynamischer Sicht gilt Folgendes: Die in Abb. 2.1 noch nicht berücksichtigte Energieform ist die sog. *innere Energie* der beteiligten Stoffe, hier also des Pendels (Masse + Aufhängung) sowie der Luft, in der sich das Pendel bewegt. Diese innere Energie ist Energie, die auf molekularer Ebene durch unterschiedliche Effekte, wie die Schwingungs- und Translationsbewegungen von Molekülen oder die Wechselwirkung zwischen den Molekülen, gespeichert wird. Veränderungen

Abb. 2.2 Reales Pendel innerhalb einer idealisierten näheren Umgebung.
 \vec{W} Widerstandskraft



dieser inneren Energie äußern sich makroskopisch (d. h. in einer über das einzelne Molekülverhalten integrierten Weise) durch Temperaturänderungen und speziell bei Fluiden ggf. auch durch Druckänderungen.

Die verlorene (thermodynamisch: dissipierte) mechanische Energie bei der realen Pendelbewegung findet sich demnach in der Erhöhung der inneren Energie des Pendels einschließlich der näheren Umgebung wieder. Dabei handelt es sich bei der „näheren Umgebung“ wieder um eine Modellvorstellung. Tatsächlich äußert sich die Erhöhung der inneren Energie aufgrund der Vernichtung mechanischer Energie durch entsprechende Temperaturerhöhungen im Pendel selbst und in der Luft, die das Pendel umgibt. Diese Luftumgebung ist prinzipiell unendlich groß, den wesentlichen Teil der Erhöhungen der inneren Energie findet man aber nur in der unmittelbaren Umgebung. In diesem Sinne kann man die „nähere Umgebung“ als den Bereich definieren, in dem ein bestimmter, hoher Prozentsatz (z. B. 99%) der Erhöhung der inneren Energie zu finden ist, s. dazu Abb. 2.2, in der zusätzlich zur Schwerkraft auch die (Luft-) Widerstandskraft eingezeichnet ist.

Das hier ausführlich behandelte Beispiel des schwingenden Pendels steht prototypisch für die Energiebetrachtung im Zusammenhang mit technischen Systemen und soll die nachfolgenden Definitionen erläutern.

2.3 Thermodynamische Aussagen zur Energie

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf technische Prozesse, in denen Energieumsätze eine wesentliche Rolle spielen. Dies können Kraftwerksprozesse zur „Energieerzeugung“ sein, es werden aber auch Heiz- und Kühlprozesse sowie elektrochemische Vorgänge ins Auge gefasst.

Aus thermodynamischer Sicht ist die Energie eine *Zustandsgröße* eines (thermodynamischen) Systems, die als solche durch die Einwirkung von *Prozessen* verändert werden kann. Der sog. erste Hauptsatz der Thermodynamik konstatiert, dass die Energie im Sinne einer *thermodynamischen Gesamtenergie* eine Erhaltungsgröße darstellt, sie also weder erzeugt noch vernichtet werden kann.

► **THERMODYNAMISCHE GESAMTENERGIE** Es handelt sich um die Summe aller einzelnen Energieformen, die in einem betrachteten technischen Prozess Veränderungen erfahren können.

Erläuterung: Einzelne Energieformen sind

- potentielle Energie
- kinetische Energie
- innere Energie
- chemische Energie
- nukleare Energie
- ...

In einem technischen Prozess, in dem weder die chemische noch die nukleare Energie verändert wird und keine weiteren Energieformen berücksichtigt werden müssen, führt man als thermodynamische Gesamtenergie die Summe aus potentieller, kinetischer und innerer Energie ein. Nur diese Teile der Energie müssen im Sinne der Energieerhaltung bei diesen Prozessen betrachtet werden.

Damit kann der Erste Hauptsatz der Thermodynamik wie folgt formuliert werden.

ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

Jedes thermodynamische System besitzt eine thermodynamische Gesamtenergie E , die eine Erhaltungsgröße darstellt und deshalb nur durch einen Energie-Transportprozess über die Systemgrenze um ΔE verändert werden kann. Es gilt

$$\Delta E = W + Q + K \quad (2.1)$$

mit den Energie-Transportprozessen

- W : Energieübertragung in Form von Arbeit
 Q : Energieübertragung in Form von Wärme
 K : Konvektive, massengebundene Energieübertragung

Dieser Hauptsatz bezieht sich prinzipiell auf unendlich viele Systeme und kann deshalb nicht abschließend bewiesen werden. Da er auch nicht aus einer bereits bewiesenen Aussage abgeleitet werden kann, gilt er zunächst solange nur im Sinne eines *Postulates* bzw. einer *Hypothese* bis durch ein Gegenbeispiel die Allgemeingültigkeit der Aussage widerlegt worden ist. Dieses Gegenbeispiel ist aber (erwartungsgemäß) bis heute nicht gefunden worden, so dass sich der Erste Hauptsatz aus wissenschaftstheoretischer Sicht durch eine *ständig wachsende Bewährung* auszeichnet. Erläuterungen zu dieser wissenschaftstheoretischen Argumentation findet man z. B. in Popper (1984).

Aus Gl. (2.1) folgt, dass alle darin auftretenden Größen dieselbe Einheit besitzen müssen, üblicherweise die Energieeinheit Joule (J), wobei gilt: $1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$.

Es muss aber unbedingt beachtet werden, dass in Gl. (2.1) „trotzdem“ zwei fundamental verschiedene Größen vorkommen: E gehört in die Kategorie der *Zustandsgrößen*; \dot{W} , \dot{Q} und \dot{K} sind hingegen *Prozessgrößen*.

Für kontinuierlich ablaufende Prozesse wird Gl. (2.1) durch eine entsprechende Zeitableitung der einzelnen Größen (im Sinne von .../pro Zeiteinheit) zu

$$dE / d\tau = \dot{W} + \dot{Q} + \dot{K} \quad (2.2)$$

Dabei stellt $\dot{W} = dW/d\tau$ als „Arbeit pro Zeit“ eine Leistung dar, die häufig mit dem Symbol P versehen wird, \dot{Q} ist ein Wärmestrom, \dot{K} ein massengebundener Energiestrom, der auch als konvektiver Energiestrom bezeichnet wird. Die Einheit dieser Größen ist üblicherweise die Leistungseinheit Watt (W), wobei gilt: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

In den bisherigen Ausführungen ist Energie zunächst nur im Sinne der Energieerhaltung *quantitativ* bilanziert worden, es fehlt bisher aber eine Aussage zu einer möglicherweise unterschiedlichen *Qualität* der einzelnen Energieformen, bzw. zu der Frage, ob sich alle Energieformen uneingeschränkt ineinander umwandeln lassen.

Energie

Richtig bewerten und sinnvoll nutzen

Herwig, H.

2016, X, 45 S. 11 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-12919-4