

Was ist empirisch am Energieerhaltungssatz?

P. Farwig, U. Backhaus und H. J. Schlichting

0. Einleitung

Der 1. Hauptsatz der Wärmelehre in der Form

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$$

ist natürlich jedermann, der physikalische Grundkenntnisse besitzt, geläufig. Der Lehrer jedoch, der erklären soll, was die einzelnen Ausdrücke in dieser Gleichung bedeuten, muß sich über die Interpretation der Beziehung Rechenschaft ablegen. Ich möchte Ihnen heute unsere Überlegungen dazu vortragen, inwiefern das Gleichheitszeichen in dieser Beziehung empirisch ist, d. h. inwieweit es möglich ist, rechte und linke Seite der Gleichung unabhängig voneinander zu beobachten.

1. Energieänderung und Wechselwirkung mit der Umgebung

Ein gegebenes physikalisches System ändert seinen Energieinhalt nur dann, wenn eine Wechselwirkung mit seiner Umgebung vorliegt; dabei fließt Energie durch seine Begrenzungen. Dieser Energiefluß ist beobachtbar, und zwar ohne daß man Veränderungen am System selbst anschauen muß.

Beispiele: Auftanken eines Pkw, Befüllen des Heizöltanks, Nahrungsaufnahme durch einen Organismus, Lieferung elektrischer Energie, Erwärmung eines Körpers.

Es ist üblich, verschiedene Übertragungsarten der Energie zu unterscheiden und mit einem besonderen Namen zu versehen:

Arbeit ΔW

Wärme ΔQ

Stoffgebundenen Energiefluß ΔE_{Stoff}

Ich kann hier nicht darauf eingehen, warum man diese drei Terme getrennt aufführt und ob und wie eine solche begriffliche Trennung eindeutig möglich ist. Hinweis: Bedeutung für Einführung der Größen S und \dot{S} . Hier kommt es auf folgendes an: Es ist beobachtbar, daß und wieviel Energie die Grenzen eines Systems überschreitet, und zwar an Veränderungen.

2. Verbleib der übertragenen Energie: Innere Energie

Letztlich führen die auf ein System übertragenen Energiemengen zu Änderungen der Bewegungszustände (und der damit verbundenen Energien) der Mikrobausteine des Systems. Solche strukturellen Veränderungen sind prinzipiell beobachtbar, und zwar am System; dazu ist es nicht erforderlich, die Umgebung anzuschauen. Solche durch Energieübertragung hervorgerufenen strukturellen Veränderungen sind z. B. Veränderungen

- der Schwingungsamplituden,
- der Gitterkonstanten,
- des Aggregatzustandes,
- der chemischen Zusammensetzung etc.,

aber auch z. B.

- des elektrischen Widerstandes,
- des Volumens, der Temperatur etc.,

die ja auch Indikatoren für die interne Struktur sind.

Durch eine Eichung kann man nun für jedes System den Zusammenhang zwischen seinem Energieinhalt und seinen strukturellen Merkmalen feststellen (U als Funktion solcher Merkmale). Man ist dann in der Lage, die Energiebilanz auf ihre Gültigkeit empirisch zu prüfen. Schema: Prüfung der Veränderung der inneren Energie durch Beobachtung von Veränderungen des Systems; Prüfung der übertragenen Energiemengen durch Beobachtung der Flüsse; Prüfung der Gültigkeit des Gleichheitszeichens.

3. Zum Eichprozeß

Wird bei der Eichung die Energieerhaltung nicht vorausgesetzt?

Bei der Eichung werden durch ein Normverfahren (z. B. elektrische Heizung) definierte Energiebeträge zugeführt und ein Zusammenhang zwischen diesen übertragenen Energiemengen und den strukturellen Merkmalen, von denen oben gesprochen wurde, festgestellt. In der Tat bleibt nun gar nichts anderes übrig, als die Energieerhaltung bei der Eichung zu postulieren, nämlich zu behaupten, daß die übertragene Energie gleich ist der Änderung der

inneren Energie. Insofern ist der Energiesatz teilweise Postulat. Es ist aber empirisch, daß die so ge-
eichte Größe innere Energie Zustandsfunktion ist.

Dieses bedeutet, daß die Bilanzgleichung bei anderen Prozessen als dem Eichprozeß bestätigt gefunden wird. Insofern ist der Energiesatz empirisch.

4. Zerlegung der inneren Energie

Lassen Sie uns einen Augenblick zur Frage zurückkehren: Wo bleibt die übertragene Energie? Welche inneren Bewegungszustände bei einem gegebenen Prozeß betroffen werden, hängt ab von

- den möglichen Energieniveaus des Systems (d. h. von seinem Hamiltonoperator)
- von den vorhandenen Anregungen (d. h. vom Zustand des Systems bei Beginn des Prozesses)
- von der Größe der übertragenen Energie, genauer von der durchschnittlich pro Mikrobau-
stein übertragenen Energie im Vergleich zu den Anregungsstufen des Systems.

Bei Vorliegen der Voraussetzungen werden bestimmt innere Bewegungszustände bevorzugt betroffen, und die übertragene Energie geht in diese Anregungsformen. Es lassen sich typische Bereich unterscheiden:

Thermische Energie: Hier handelt es sich um die Energie, die mit der ungeordneten Wärmebewegung der Mikrobau-
steine verknüpft ist. Typische Größe: einige Hundertstel bis einige Zehntel eV pro Teilchen.

Chemische Energie: Energie der geordneten Bewegung der bindenden Elektronen. Typische Größe: einige Elektronenvolt pro Teilchen.

Kernenergie: Energie der geordneten Bewegung der Kernbausteine. Typische Größe: einige bis viele MeV pro Teilchen.

Damit ist eine Zerlegung der linken Seite unter bestimmten Voraussetzungen näherungsweise möglich. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diese Zerlegung i. a. nicht eindeutig ist und daß eine eindeutige Zuordnung von Summanden der linken und der rechten Seite im allgemeinen unmöglich ist. So wird sich im allgemeinen die zugeführte Wärmemenge nicht allein im thermischen Anteil der inneren Energie wiederfinden.

Selbstverständlich bleibt die Gleichung, die empirischer Ausdruck des Energieerhaltungssatzes ist, mathematisch richtig, wenn man Terme von der linken auf die rechte Seite umstellt. Allerdings ändert sich dann ihre Bedeutung. Ich schlage daher vor, solche Umstellungen nicht zu machen bzw. die damit verbundene Bedeutungsänderung zu beachten.

5. 1. Hauptsatz und Gibbsche Form

Man kann die Terme der rechten Seite gelegentlich als Differentiale in den Zustandsgrößen des Systems und das Ganze als Gibbsche Form schreiben:

$$- p\Delta V + T\Delta S + \mu\Delta N$$

Hier ist allerdings Vorsicht am Platz, da quasistatische Prozeßführung vorausgesetzt werden muß(wenigstens die intensiven Zustandsgröße müssen während des Prozesses existieren). Außerdem wird allzu leicht der Eindruck erweckt, zur Messung der Energieflüsse bedürfe es Beobachtungen am System, was nicht der Fall ist.

6. Führung eines Bankkontos – Analogie zum 1. Hauptsatz

Durch Erörterung einiger Aspekte der Führung eines Bankkontos und Gegenüberstellung zu Aspekten des Energiesatzes möchte ich die Thesen meines Vortrages zusammenfassen und veranschaulichen.

Veranschaulichung 1. Hauptsatz durch Analogie

Wirklichkeit:

System

Modell:

Konto

Übertragungsform:

Arbeit, Wärme,
stoffgebundener
Energiefluß

Bareinzahlung,
Überweisung,
Scheck

Speicherform:

thermische Energie,
chemische Energie,
etc.

Teilkonten:
Sparbuch, Girokonto,
Sonderkonto

Rückmeldung:

Strukturelle Ver-
änderungen

Kontoauszug

Überprüfbarkeit:

ja, nach Verab-
redung!

ja, durch Vergleich
der Kontoauszüge mit
Einnahmen, Ausgaben
+ Inhalt Geldbörse