

222 Potenzielle Energie – update

ZUSAMMENFASSUNG

Um Energiebilanzen zu beschreiben, wird, vor allem in der Mechanik, der Begriff „potenzielle Energie“ eingeführt, meist über die Verschiebung eines Probekörpers in einem konservativen Kraftfeld. Sie wird oft dem Körper zugeordnet, manchmal einem System aus zwei Körpern. Die Vorstellung, die dadurch von der Energie vermittelt wird, unterstützt die Auffassung, die man bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts hatte, die aber längst durch eine modernere Sicht abgelöst wurde.

Gegenstand

Zur potentiellen Energie findet man etwa die folgenden Aussagen oder Definitionen:

- (Hochschule) „Hebt man nahe dem Erdboden einen Körper der Masse m in die Höhe h , so leistet man gegen die Schwerkraft mg eine Arbeit
 $W = E = mgh$.
Sie steckt ebenfalls als Energie in dem Körper; man kann sie zum Beispiel jederzeit in ebenso viel kinetische Energie verwandeln, in dem man den Körper fallen lässt.“
- (Schule) „Um auf der Erde einen Körper der Masse m um die Strecke Δr , anzuheben, muss ihm Energie zugeführt werden. Dabei erhöht sich seine potenzielle Energie um den Betrag...“
- (Wikipedia, Stichwort Potentielle Energie) „Für eine Bewegung entgegen der Gewichtskraft muss am Körper Arbeit aufgewendet werden, die nun als potentielle Energie in ihm gespeichert ist.“
- (Hochschule) „... Man nennt V die potentielle Energie des Massenpunktes m ...“
- (Hochschule) „Diese Arbeit wird als potentielle Energie mgh im System aus Erde und Skifahrer gespeichert.“
- (Schule) „Die Lageenergie oder potentielle Energie des Systems Erde-Körper der Masse m in Bezug auf ein frei wählbares Bezugsniveau beträgt $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$.
...
Die Spannenergie oder potentielle Federenergie einer Feder mit der Federkonstanten D , die vom entspannten Zustand um die Strecke s gespannt wird, beträgt“
- (Hochschule) „In vielen Fällen führt eine Arbeit, die an einem System verrichtet wird, nicht wie bei einem einzelnen Massenpunkt zu einer Änderung der kinetischen Energie, sondern wird als so genannte potentielle Energie ‘gespeichert’“.
- (Hochschule, theoretische Physik) Neben der kinetischen Energie definieren wir die potentielle Energie V durch...
 $V = E_{\text{pot}} = -\int F dx$.“
- (Brockhaus 1926) „Die einem Körper innewohnende mechan. E. ist die Folge entweder seiner Lage gegenüber der Umgebung (z.B. bei einer gehobenen Last, bei angestautem Wasser) oder (z.B. bei elastischen Körpern) der Lage seiner kleinsten Teile zueinander (E. der Lage, potentielle E., auch ‘Spannkraft’)...“
- (Hochschule, 1936) „Die Fähigkeit eines Körpers, infolge seiner Lage oder der Anordnung seiner Teile u. ä., Arbeit zu leisten, heißt seine potentielle Energie. Die potentielle Energie... wird gemessen durch das Produkt aus der wirkenden Kraft ...“
- (Brockhaus 1910, Stichwort „Energie“) „Die Energie kann entweder aktuell, d.h. in Arbeitsleistung tatsächlich begriffen sein, kinetische E., oder sie kann vorhanden sein, ohne wirklich Arbeit zu leisten, als ruhende, potentielle oder statische Energie.“

Mängel

Man kann für die Energie (wie für andere extensive Größen auch) eine Dichte und eine Stromdichte angeben, d.h. man kann von der Energie sagen, wo sie sich befindet und welchen Weg sie nimmt wenn sie strömt.

Wie steht es in dieser Hinsicht mit der potenziellen Energie? Wo befindet sich die potenzielle Energie in den verschiedenen Situationen, die man diskutiert?

Das ist eine Frage, auf die Studenten und Schüler entweder gar keine Antwort erhalten, oder eine von mehreren Antworten, die nicht so recht zusammenpassen.

- Wir betrachten zunächst den Fall, dass ein Körper auf der Erde angehoben wird.

Unter unseren Zitaten ist das erste am klarsten: Die potenzielle Energie steckt im Körper. Das „steckt in“ ist gutes, verständliches deutsch. Es drückt klar aus, wo sich die Energie befindet.

Auch die Zitate 2 und 3 sagen es klar: Die potenzielle Energie des Körpers erhöht sich bzw. wird in ihm gespeichert, und auch ein Lehrbuch der Theoretischen Physik, Zitat 4, bekennt sich dazu: V ist die potenzielle Energie eines Massenpunktes. (Nebenbei: Würde der Autor auch sagen, m sei die Masse eines Energiepunktes?)

Nun gibt es dabei ein Problem. Wenn die Energie im Körper oder Objekt enthalten ist, befindet sich dann auch die potenzielle Energie des Mondes im Mond? Oder betrachten wir ein Doppelsternsystem mit zwei Sternen gleicher Masse. Welcher von beiden hat jetzt die potenzielle Energie? Oder nochmal zurück zu unserem anfänglichen Beispiel: Ein kleiner Körper, etwa ein Stein, „im Gravitationsfeld der Erde“ (wie man gern sagt). Man könnte es auch umdrehen: Man verschiebt die Erde im Gravitationsfeld des Steins. Man bekommt denselben Wert für die „potenzielle Energie“. Wessen potenzielle Energie? Diesmal die der Erde?

Manche Autoren sind daher vorsichtiger. So wird in den Zitaten 5 (Hochschule) und 6 (Schule) die Energie im System aus Erde und Objekt (Skifahrer bzw. Körper) gespeichert. Das würde bedeuten, im Fall des Mondes ist sie im System Erde-Mond gespeichert, und im Fall des Doppelsternsystems im Doppelsternsystem. Wie soll man sich das aber vorstellen: Ist sie auf die beiden Körper verteilt? Wenn ja, in welchem Verhältnis? Dass die Autoren dabei möglicherweise im Kopf haben, dass zu dem System Erde-Körper auch ein Feld gehört, sagen sie nicht. Glauben sie, der Leser sei noch nicht reif dafür?

Wieder andere Autoren sind noch vorsichtiger: Die Energie wird einfach gespeichert, Zitat 7. Wo sie gespeichert wird, wird nicht verraten. Es ist eine vernünftige Erwartung der Leser, das zu erfahren, denn wenn man von „speichern“ spricht, bekennt man sich klar zu einer mengenartigen Vorstellung von der Energie, und wenn man irgendeine Menge speichert, so muss es einen Ort geben, an dem sie gespeichert ist.

2. Aus der Art, wie die potenzielle Energie in Hochschulbüchern eingeführt wird, nämlich als Wegintegral über die Kraft in einem „konservativen Kraftfeld“, siehe unser Zitat 8, folgt, dass der Begriff nicht auf Gravitationsfelder zu beschränken ist. Man kann also die entsprechenden Sätze auch formulieren, wenn man eine „Probeladung“ im elektrischen Feld eines anderen geladenen Körpers verschiebt, oder auch einfach, wenn man an einer elastischen Feder zieht. Hier ist es nun offensichtlich, dass man nicht sagen kann, die Energie befinde sich in der Probeladung oder in dem Haken an bewegten Ende der Feder. Die Energie befindet sich, darüber gibt es hier keinen Zweifel, im elektrischen Feld bzw. in der Feder. So wird es etwa in unserem Zitat 6 gesagt. Man hätte es allerdings noch klarer ausdrücken können. Fast schon lustig ist eine Formulierung aus dem Brockhaus von 1926 (Zitat 9). Man sieht, wie sich der Autor dagegen sträubt, ein Feld in die Erklärung der Vorgänge einzubeziehen. Das Zitat verrät uns aber auch, welche historische Bürde wir immer noch mit uns herumschleppen.

3. Unabhängig davon, wo man die Energie schließlich verortet, wird in jedem Fall der Eindruck erweckt, die Energie sei im Wesentlichen eine mechanische Größe, wodurch man sich für die späteren Unterrichtsthemen einen großen Stein in den Weg legt.

4. Schließlich noch zum Namen: Warum soll man die Energie als potenziell bezeichnen, nur weil sie in einem ruhenden System gespeichert ist? Schließlich sagt man von einem geladenen Kondensator auch nicht, auf seinen Platten befinde sich potenzielle Ladung.

Herkunft

Es kommt wohl einiges zusammen.

Obwohl bei der Einführung der Energie durch Joule und Mayer klar war, dass sie eine Größe ist, die sowohl mechanische als auch thermische Prozesse beschreibt, hat wohl jeder im 19. Jahrhundert verbreitete Glaube, dass die Welt im Wesentlichen mechanisch zu erklären sei, seine Spuren hinterlassen. Seinen Beitrag zu dieser Auffassung hat sicher auch die Hamiltonsche Punktmechanik geleistet. Die Arbeiten von Planck [1], Poynting [2] und Heaviside [3], und der schöne Übersichtsartikel von Gustav Mie aus dem Jahr 1898 [4] kamen ebenso wenig dagegen an wie die Entwicklung der Thermodynamik durch Gibbs und Helmholtz. Warum lernt man noch heute einen Satz der Erhaltung der mechanischen Energie, nicht aber einen der elektrischen oder chemischen? „Die Energie ist ein Bewegungsintegral“ lautet das Credo der theoretischen Physik. Reibungsvorgänge sind in dieser Welt ein Übel, das man zu vermeiden trachtet.

Und noch einmal zur Bezeichnung „potenziell“: Ein Körper, der sich in großer Höhe über der Erdoberfläche befindet, habe mehr Energie als einer weiter unten. Aber wie kann das sein? Man sollte erwarten, dass man dem Gegenstand seine Energie irgendwie ansieht: dass er sich bewegt, dass er heiß ist, unter Druck steht... Die beiden Körper unterscheiden sich aber in nichts außer ihrer „Lage“. Trotzdem soll der eine mehr Energie haben als der andere? Da scheint die Bezeichnung potenziell doch am Platze zu sein. Gewiss – so lange man noch keine Felder kannte, war das, was den oberen Körper auszeichnet, nur seine Position, ein Versprechen gewissermaßen: Wenn du mir die Gelegenheit dazu gibst, leiste ich Arbeit.

Aber auch lange nachdem die Identität von Masse und Energie entdeckt worden war, wurde noch die alte Sprache verwendet, siehe die Zitate 10 und 11. In einem angesehenen Hochschulbuch (Zitat 10), das noch 1957 gedruckt wurde, ist die Energie eine „Fähigkeit“.

Entsorgung

Sage klar, wo sich die Energie befindet, um wie viel sie sich ändert, welchen Weg sie nimmt, wenn sie fließt. (Tue dasselbe für die anderen extensiven Größen, insbesondere auch für den Impuls und die Entropie.)

Die Energie wird beim Ziehen an der Feder in der Feder gespeichert, und zwar bei einer normalen Feder gleichmäßig über die Länge verteilt.

Beim Verschieben eines geladenen Körper bei Anwesenheit eines anderen wird sie im elektrischen Feld gespeichert (oder dem Feld entnommen). Damit ist das wirklich vorhandene Feld gemeint, also nicht nur das Feld des einen der beiden Körper. Die Formel für die Energiedichte sollte jeder Student (und eigentlich auch jeder Schüler) kennen.

Beim Laden einer Batterie wird sie...usw.

Man mag ein Problem sehen beim Gravitationsfeld: hier ist die Energiedichte negativ. Das ist unvermeidlich, solange die Beschreibung nicht mit der Allgemeinen Relativitätstheorie geschieht.

Beim Fallen eines Körpers nimmt seine Energie zu. Sie kommt aus dem Gravitationsfeld, dessen Gestalt durch die Erde und den betrachteten Körper bestimmt ist. Die des Feldes nimmt dabei ab, d.h. der Betrag der negativen Feldenergie nimmt zu.

Um die Energieströmung zu beschreiben braucht man eine zweite Feldstärke, die „gravitomagnetische“ Feldstärke, so wie man in der Elektrodynamik zur Berechnung des Poynting-Vektors außer der elektrischen noch die magnetische Feldstärke braucht.

Die gravitomagnetischen Kräfte (die den magnetischen Kräften in der Elektrodynamik entsprechen) sind wegen der Kleinheit der Kopplungskonstante der Gravitation für die meisten irdischen Anwendungen, unmessbar klein. Sehr deutlich äußert sich das gravitomagnetische Feld dagegen über den Energiestrom. Auch wenn wir dessen Strömungsfeld nicht berechnen wollen, ist es doch wichtig zu wissen, dass man es kann, denn nur dann kann man eine stimmige Sprache bei der Beschreibung der Gravitation verwenden: Die Energie, die der fallende Körper bekommt, kommt aus dem Gravitationsfeld. Wir brauchen nicht zu sagen, sie sei nur potenziell vorhanden.

[1] M. Planck: Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Verlag von G. E. Teubner, Leipzig und Berlin, 1908 (erste Auflage 1887), S. 117-118

[2] J. H. Poynting: On the transfer of energy in the electromagnetic field, Phil. Trans. A, 1884, S. 343-361.

[3] O. Heaviside: The Electrician 27, 3. Juli 1891

[4] G. Mie, Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band VIII. Heft (1898), S. 1113