

20. Die Energie als Basisgröße. Masse und Materie, Energie und Strahlung

20.1. In den Naturwissenschaften werden 'verschiedene Energien' unterschieden: «Translationsenergie» und «Rotationsenergie» (zusammengefaßt zu den «kinetischen Energien»), «potentielle Energie» (mit den «kinetischen Energien» zusammengefaßt zu den «mechanischen Energien»), «thermische Energie», «elektrische Energie», «chemische Energie», ... Man spricht aber nicht von verschiedenen "Energien" oder von "verschiedenen Energiearten", sondern von verschiedenen «Energieformen», und zwar ohne daß definiert würde, was das Wort "Form" in Verbindung mit dem Wort "Energie" bedeuten soll. Die Rede von den verschiedenen 'Energieformen' sollte umso mehr auffallen, als die Energien aller Energiehaber in einer Ausmaßrelation miteinander verglichen und damit auch addiert werden können und daß sie bei der Addition wieder eine Energie ergeben. (Wie könnte sonst ein allgemeines Energieerhaltungsgesetz ausgesagt werden?)

Ebenso können alle Kräfte, gleichgültig zwischen welchen Relationspartnern sie wirken, addiert werden. Das entspricht der Tatsache, daß sich Kräfte auch realiter überlagern können. (Wird zum Beispiel unter eine [aus einem unmagnetischen Stoff bestehende] Waagschale, auf der ein Eisenstück liegt, ein Magnet gelegt, wirken auf das Eisenstück sowohl die Gewichtskraft zwischen Eisenstück und Erde wie auch die magnetische Kraft zwischen Eisenstück und Magnet.) Diese Tatsache hat erfreulicherweise verhindert, daß die zwischen verschiedenen Relationspartnern wirkenden Kräfte als 'verschiedene Kraftformen' bezeichnet werden,

Dem entsprechend werden alle 'Energieformen' in Bezugsgrößen der gleichen Art angegeben, zum Beispiel in der Einheit "1 Joule" (1 J). Alle Energieeinheiten, zum Beispiel 1 Newton • Meter (1 Nm) oder 1 Kilowatt • Stunde (1 kWh) sind mit dieser Einheit durch Gleichheitsbeziehungen verbunden: $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$; $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

Es wurde bis jetzt noch nicht hinreichend geklärt, welche Eigenschaft der Name "Energie" bezeichnen soll. Am anschaulichsten ist es, diese Eigenschaft als "Arbeitsfähigkeit" zu umschreiben. Ich werde sie im folgenden (trotz eines Bedenkens) auch so nennen.

Wenn zwei Dinge oder zwei Dingsysteme miteinander wechselwirken, verliert das eine Ding oder System (zum Beispiel eine stoßende Kugel oder der mechanische Teil eines Wasserkraftwerks) Arbeitsfähigkeit, und das andere Ding beziehungsweise System (die gestoßene Kugel oder der an den mechanischen Teil angekoppelte elektrische Teil des Kraftwerks) gewinnt Arbeitsfähigkeit. Es wird aber - im Falle des Kraftwerks - nicht «mechanische Energie» in «elektrische Energie» «umgewandelt»; und es wird Energie nur insofern von einem Energiehaber auf einen anderen «übertragen», als beim Wechselwirken der eine Energiehaber soviel Energie (Arbeitsfähigkeit) verliert, wie der andere gewinnt. Die Meinung, daß beim Wechselwirken zweier dinglicher Sachen eine «Energieform» in eine andere «umgewandelt» werde, wird sicherlich dadurch verstärkt, daß wir die Energie, die die erste, durch bestimmte physikalische Größen charakterisierbare Sache abgibt, und die gleich große Energie, die die zweite, durch andere physikalische Größen kennzeichnende Sache aufnimmt, mit Hilfe unterschiedlich formulierter Größenterme beschreiben, im Falle eines mechanischen und eines elektrischen Systems zum Beispiel durch die Terme " $W(\text{kin}) = (1/2) \cdot m \cdot v^2$ " und " $W(\text{el}) = U \cdot I \cdot t$ " (kin: kinetisches System; el: elektrisches System; U : elektrische Spannung; I : elektrische Stromstärke).

Zu den irreführenden Ausdrücken "Energieform" und "Energieumwandlung" kam man vor allem dadurch, daß man die Gleichartigkeit (und nicht nur Äquivalenz) der an verschiedene Energiehaber gebundenen Energien nicht gleich erkannte und daß man die Urgröße "Energie" gar

nicht erst phänomenologisch zutreffend zu erfassen suchte, sondern für die an verschiedene Sachen gebundenen Energien gleich verschiedene mathematische Ausdrücke verwendete, die wie Ersatzgrößen aussehen. Nachdem uns das Verfahren der Ersatzgrößeneinführung geläufig ist, können wir bei der Energie in ähnlicher Weise vorgehen wie in den vorstehenden Abschnitten. Im Gegensatz zu den früheren Beispielen sind aber - wenn wir die Verwendung der verschiedenen Energietermine verstehen wollen - im Falle der Energie die Gesetzeskonstanten k_i nicht mit der Energie W zusammenzufassen, sondern mit einer der Größen, die in den für die Energie angegebenen Größenprodukten als Faktoren fungieren. Dabei ergeben sich zum Beispiel die folgenden Gleichungen:

(1) Verschiebungsenergie (Arbeit):

$$(20.1) \quad W(\text{Verschiebung}) = k_{11} \cdot F^* \cdot l(S) = F \cdot l(S), \text{ wobei } F = k_{11} \cdot F^* \text{ ist.}$$

Die in der üblichen Gleichung " $W = F \cdot s$ " [" $W = F \cdot l(S)$ "] stehende Kraft F ist also nicht identisch mit $F^* = F/k_{11}$.

(2) Trägheitsenergie eines gleitenden (sich translatorisch bewegenden) Dinges:

$$(20.2) \quad W(\text{gleitendes Ding}) = k_{12} \cdot 1/2 m_{\text{tr}}^* \cdot v_G^2 = 1/2 m_{\text{tr}} \cdot v_G^2$$

wobei $m_{\text{tr}} = k_{12} \cdot m_{\text{tr}}^*$ ist.

(3) Trägheitsenergie eines sich drehenden Dinges:

$$(20.3) \quad W(\text{drehendes Ding}) = k_{13} \cdot 1/2 \cdot I^* \cdot \omega^2 = 1/2 \cdot I \cdot \omega^2.$$

(4) Potentielle Energie eines Dinges im Schwerfeld der Erde (allgemein: Energie eines 'gespannten' Systems):

$$(20.4) \quad W(\text{System "Erde/Ding"}) = k_{14} \cdot m_s^* \cdot G \cdot l(H) = m_s \cdot G \cdot l(H)$$

(G: Gravitationsfeldstärke; $l(H)$: Länge des Hub- beziehungsweise Fallweges).

(5) Mit einem Elektrizitätsfluß verbundene Energie:

$$(20.5) \quad W(\text{Elektrizitätsfluß}) = k_{15} \cdot U^* \cdot I \cdot t = U \cdot I \cdot t.$$

Würden die Verknüpfungskonstanten k_i mit der Energie W zusammengefaßt, könnte man nicht verstehen, daß alle dann entstehenden Größen ($W/k_{11} = F^* \cdot l(S)$; $W/k_{12} = 1/2 m_{\text{tr}}^* \cdot v_G^2$; ...) in Bezugsgrößen der gleichen Art angegeben werden können. Werden die Konstanten dagegen wie in den vorstehenden Gleichungen mit anderen Größen zusammengefaßt ($k_{11} \cdot F^* = F$; $k_{12} \cdot m_{\text{tr}}^* = m_{\text{tr}}$..) ist selbstverständlich, daß alle für die Energie W einsetzbaren Größenterme [$F \cdot l(S)$; $U \cdot I \cdot t$, ...] eben Terme für die Energie W selbst sind und deshalb in Bezugsgrößen der gleichen Art angegeben werden (müssen). Die mit " $F \cdot l(S)$ ", " $U \cdot I \cdot t$ ", ... symbolisierten Größen sind also - um es zu wiederholen - keine Ersatzgrößen für die Energie; sie sind die Energie selbst - nur ausgedrückt mit Hilfe von Größen, die für den jeweiligen Energiehaber wesentlich sind. Ersatzgrößen sind vielmehr (in den vorstehenden Beispielen) die Größen von $F = k_{11} \cdot F^*$ bis $U = k_{15} U^*$

Im Verlauf der Entwicklung der Energetik (in der die sogenannten Energieäquivalente eine gro-

ße Rolle spielten) erkannte man offenbar nicht nur, daß die verschiedenen «Energieformen» einander nicht nur äquivalent, sondern daß sie von gleicher Art sind (daß es sich also nicht um verschiedenartige Arbeitsfähigkeiten handelt, sondern um die Arbeitsfähigkeiten verschiedener Sachen); man behandelte - offenbar unbewußt - die Energie auch wie eine Basisgröße, faßte aber die Verknüpfungskonstanten k_i nicht mit dieser zusammen, sondern - wie in den Gleichungen 20.1 bis 20.5 angenommen - mit einer jeweils anderen Größe.

Es scheint an der Zeit zu sein, diesen Schritt nun auch bewußt zu vollziehen und die Energie als Urgröße in den Vordergrund der Betrachtungen zu rücken. Es wäre erfreulich, wenn sie - wie schon von vielen angeregt - auch als Basisgröße eingeführt werden könnte. (Das würde auch ihrer Bedeutung als allgemeiner Bilanzierungsgröße entsprechen.) Wäre das (aus meßtechnischen Gründen) nicht möglich, könnte - und sollte - sie im Unterricht erst an einer späteren Stelle als abgeleitete Größe behandelt werden.

Wird die Energie als Urgröße beibehalten, werden - wie vorstehend ausgeführt - die Kraft F , die Trägheit m_{tr} , das Trägheitsmoment I , die Schwerheit m_s , die elektrische Spannung U , ... zu Größen, die von der Energie abgeleitet sind (Tabelle 20.1), und es können die Sachverhalte treffender und übersichtlicher als bisher dargestellt werden.

Bei dieser Einführung wäre also nicht die Energie eine zum Beispiel von Kraft und Länge abgeleitete Ersatzgröße ($W = F \cdot l$); es wäre dann Energie als Urgröße und als Basisgröße die Kraft eine von Energie und Länge abgeleitete Ersatzgröße ($F = W+/l$).

Gleichungsnummer	Bestimmungsgleichung	Definitionsgleichung
(20.6)	$F_1 = \frac{W(A)}{l(S)_1}$	$F = \frac{W^+}{l}$
(20.7)	$m_{tr1} = \frac{2 \cdot W^+(\text{trans})_1}{v_{G1}^2}$	$m_{tr} = \frac{W^+}{v_G^2}$
(20.8)	$I_1 = \frac{2 \cdot W^+(\text{rot})_1}{\omega_1^2}$	$I = \frac{2 \cdot W^+}{\omega^2}$
(20.9)	$m_s = \frac{W^+(\text{pot})_1}{G \cdot I(H)}$	$m_s = \frac{W^+}{G \cdot I}$
(20.10)	$U_1 = \frac{W^+(\text{el})_1}{I_1 \cdot t_1}$	$U = \frac{W^+}{l \cdot t} = \frac{W^+}{Q}$

Tabelle 20.1. Terme für Größen, die sich ergeben, wenn sie von der Energie als Urgröße abgeleitet werden

Das würde verständlich machen, daß die Kraft F ein mathematisch so konstruierter Quotient " $F = W^+/l$ " ist, daß $F \cdot l$ eben eine Energie und $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$ ist. (Entsprechendes gilt für alle anderen in Rede stehenden Größen.)

Das Einführen der Energie als Basisgröße hätte selbstverständlich viele Auswirkungen, zum Beispiel auch auf das im Abschnitt 15.3 Gesagte: Die Arbeit $W^+(A)$ wäre dann eine Urgröße und die Drehmomentenersatzgröße M wäre dann nicht der Arbeitersatzgröße gleich, sondern der Arbeit selbst:

$$(20.11) \quad M_1 = 3 \text{ Nm} \wedge W^+(A)_1 = 3 \text{ Nm} \rightarrow M_1 = W^+(A)_1 \rightarrow M = W^+(A),$$

in Worten: Die (skalare) Drehmomentenersatzgröße M ist gleich der Urgröße "Verschiebungsarbeit $W^+(A)$ ".

Soll das Umgehen mit der Energie verständlich durchgeführt werden können, müßte der Physikunterricht neu durchdacht und anders als bisher durchgeführt werden. Anstatt den Schülern einzureden, daß es verschiedene «Energieformen» gäbe, wäre vor allem zu erarbeiten, was die Eigenschaft "Energie" ist, die - unbeschadet aller Sachbindungen - immer mit sich selbst identisch ist, und bewußt zu machen, wie Wechselwirkungen zwischen Dingen und Dingsystemen wirklich erfolgen. So lange den Schülern 'beigebracht' wird, daß es verschiedene «Energieformen» und «Energieumwandlungen» gebe, so lange wird verhindert, daß die Schüler zutreffend erfassen, was die Eigenschaft "Energie" tatsächlich ist.

Es würde vielleicht nicht so schwierig sein, die Energie im Unterricht als Urgröße einzuführen, wie man zunächst wohl annehmen möchte. - Es haben sicherlich schon viele Physiklehrer erlebt, daß Schüler - zum Beispiel bei der Besprechung der schiefen Ebene - in einer nicht erwarteten Weise reagieren. Wenn erarbeitet wird, daß man zum reibungsfreien Verschieben eines Dinges auf einer schiefen Ebene, die - salopp gesagt - viermal so lang wie hoch ist, nur ein Viertel der Kraft benötigt, die zum senkrechten Hochheben erforderlich ist, sind nachdenkliche Schüler mit diesem Ergebnis oft nicht recht einverstanden. Ihr Gegenargument lautet etwa: "Man braucht zwar nur ein Viertel der Kraft; dafür braucht man die Kraft aber auch viermal so lang; und damit braucht man doch die ganze Kraft." Aussagen dieser Art zeigen, daß mindestens einzelne Schüler mit dem Wort "Kraft" die Vorstellung verbinden, die wir mit dem Wort "Arbeit" bezeichnen, und zeigen damit nicht nur, daß die Begriffe "Kraft" und "Arbeit" von den betreffenden Schülern noch nicht hinreichend unterschieden werden, sondern auch - und das ist hier wesentlich - daß die Vorstellung der Arbeit mindestens einzelnen Schülern offenbar durchaus nahe liegt. - Ich brauche nicht besonders zu betonen, wie wichtig für Lehrer und Didaktiker die Aussagen von Schülern sind, die nicht nur hinnehmen und nachsprechen, was ihnen im Unterricht gesagt wird, sondern die versuchen, ihren in den Unterricht mitgebrachten Vorstellungen Ausdruck zu geben. - Wenn wir den traditionell eingefahrenen Weg nicht von vornherein für unumkehrbar halten, sondern uns bemühen, die phänomenologischen Betrachtungen zu diesen beiden Größen zu intensivieren, könnte durchaus eine Möglichkeit gefunden werden, die Arbeit, also eine Energie, vor der Kraft einzuführen. Diese Möglichkeit müßte allerdings sehr überzeugend sein, weil die Kraft als Urgröße wohl immer besser unmittelbar erfahrbar (erlebbar) bleiben wird als die Energie. - Außerdem ist zu bedenken, daß die Kraft als das bewirkende Agens für das Verständnis physikalischer Vorgänge sehr viel wichtiger ist als die Energie, die bekanntlich bei allen Vorgängen konstant ist (erhalten bleibt) und damit nur die Rolle einer Bilanzierungsgröße spielt, also kein Agens ist. Die große Bedeutung der Energie (als physikalischer Größe) liegt darin, daß sie ermöglicht, auch ohne genauere Kenntnis von Einzelvorgängen Aussagen über Gesamtvorgänge zu machen. Wenn wir zum Beispiel beim Stoß zweier elastischer Kugeln nicht wissen, während welcher Dauer die sich verformenden Kugeln miteinander in Berührung stehen und wie sich die Kraft (das Ausmaß der wechselseitigen Einwirkung) während dieser Dauer ändert, so können wir doch sagen, daß die Summe der Energien beider Kugeln nach dem Stoß gleich groß ist wie die vor dem Stoß, und können aus diesem Wissen weiterführende Schlüsse ziehen - insbesondere wenn neben dem Energieerhaltungssatz auch der Satz von der Erhaltung des Impulses herangezogen wird. - Wer glaubt, mit energetischen Betrachtungen allein auszukommen und auf eingehende Kraftbetrachtungen verzichten zu können, erschließt den Schülern nicht das volle Verständnis der Vorgänge. (Eine weitere Betrachtung des sich hier abzeichnenden didaktischen Problems kann leider nicht Gegenstand dieser Untersuchung sein.)

Im übrigen ist zu wiederholen, daß wir auch für die Kraft verschiedene mathematische Aus-

drücke verwenden, so zum Beispiel für die Trägheitskraft $F(\text{tr})$ den Term $m_{\text{tr}} \cdot a_G$, für die Gravitationskraft $F(\text{grav})$ den Term " $m_s \cdot G$ " und für die elektrische Kraft $F(\text{el})$ den Term " $Q \cdot E$."

Das hat - da uns die Kraft anschaulich besser zugänglich ist als die Energie - bis jetzt erfreulicherweise niemanden dazu verführt, die Termini "Kraftform" und "Kraftumwandlung" einzuführen. Ich hoffe, daß dieses Beispiel hilft, die Rede von den verschiedenen «Energieformen» und «Energieumwandlungen» in der Wissenschaftssprache zum Verstummen zu bringen.

20.2. An dieser Stelle ist - als Nachtrag zum Abschnitt 4 - noch anzumerken, daß das Wort "Energie" nicht nur zur Bezeichnung einer Eigenschaft, sondern auch als Name einer Sache verwendet wird.

Das ist zum Beispiel der Fall, wenn Albert Einstein schreibt /3/: «Wir haben also jetzt zwei Substanzbegriffe, Materie und Energie» oder an einer anderen Stelle: «... Energie besitzt Masse». In Hochschullehrbüchern /zum Beispiel in 12/ finden sich häufig Sätze der Art «Chemische Reaktionen sind nicht nur mit einem Materie-umsatz, sondern auch mit einem Energie-umsatz verknüpft» oder Überschriften der Art «Die gegenseitige Umwandlung von Masse und Energie». Nach Besprechung der «Einsteinschen Masse-Energie-Äquivalenzgleichung»,

(20.12) $m = E/c^2$ (c: Lichtgeschwindigkeit),

wird gesagt, «daß das Gesetz von der Erhaltung der Masse nur begrenzte Gültigkeit besitzt», daß sich zum Beispiel «bei Kernreaktionen ... mit ihren ungeheuren Energie-umsätzen ... die zwingende Notwendigkeit (ergab), den Gültigkeitsbereich des Gesetzes (von der Erhaltung der Masse) einzuschränken».

Werden die Erkenntnisse der Relativitätstheorie zutreffend verstanden, ist genau das Gegenteil richtig. Das wird klar, wenn man Eigenschaftshaber und Eigenschaft terminologisch unterscheidet. Wenn Masse m und Energie W (in 20.12 wie im Original mit " E " bezeichnet) Zeichen für Eigenschaften sind - was in jeder Größengleichung der Fall ist -, müssen die Eigenschaftshaber selbst anders benannt werden, zum Beispiel mit den ad hoc eingeführten Namen "Materieportion" und "Strahlungsportion". Diese Namen sind sicherlich nicht optimal, werden aber der üblichen Ausdrucksweise gerecht, nach der Materie zerstrahlen und Strahlung sich materialisieren kann. Wenn sich Materie und Strahlung ineinander umwandeln können, kann es keinen Satz von der Erhaltung der Materie und keinen Satz von der Erhaltung der Strahlung geben. Es gibt dann nur einen Satz von der Erhaltung der Substanz - unter der Voraussetzung, daß man Materie und Strahlung mit Einstein unter dem Obernamen "Substanz" zusammenfaßt.

Da nach der Relativitätstheorie jede Materieportion Masse und Energie hat und da ebenso jede Strahlungsportion Masse und Energie hat, bleiben die richtig verstandenen Sätze von der Erhaltung der Masse und von der Erhaltung der Energie in der Relativitätstheorie vollauf gültig. Genau muß man sogar sagen, daß sie überhaupt erst mit dieser Theorie gültig werden. Erst wenn man weiß, daß eine von einer Materieportion abstrahlende Strahlungsportion ebenfalls eine Masse hat, und zwar nach der Beziehung „ $m = E/c^2$ “, kann man sagen, daß die Masse der Materieportion vor der Teilerstrahlung ebenso groß ist wie die Masse der nach diesem Prozeß noch vorhandenen etwas kleineren Materieportion und die Masse der entstandenen Strahlungsportion zusammen. Entsprechend gilt: Erst wenn man weiß, daß auch eine Materieportion Energie hat, und zwar nach der gleichen Beziehung " $E = m \cdot c^2$ ", kann man sagen, daß die Energie der Materieportion vor der Teilerstrahlung ebenso groß ist wie die Energie der nach diesem Prozeß noch vorhandenen Materieportion und die Energie der entstandenen Strahlungsportion zusammen. Erst mit der Relativitätstheorie gilt der Satz von der Erhaltung der Masse uneinge-

schränkt und ebenso der Satz von der Erhaltung der Energie. Was nicht gelten würde, wären - wie schon gesagt - Sätze von der Erhaltung der Materie und von der Erhaltung der Strahlung.

Und selbstverständlich kann es - entgegen oft zu hörenden Behauptungen - keinen Satz von der Erhaltung der Summe von Masse und Energie geben. Wenn Masse und Energie verschiedenartige Eigenschaften sind und damit verschiedenartige Größen, können sie nicht zu einer (mathematischen) Summe zusammengefaßt werden: " $m_1 + E_2$ " (= " $m_1 + m_2 \cdot c^2$ ") ist kein Symbol für eine mathematisch mögliche Summe.

Diese Ausführungen über Materie und Strahlung gelten nicht nur für den Fall, daß Materie zerstrahlt oder Strahlung sich materialisiert. Wenn ein Ding bei einer beschleunigten Gleitbewegung eine größere ('kinetische') Energie erhält, nimmt es nach der Relativitätstheorie Substanz auf und vergrößert dabei nicht nur seine Energie, sondern auch seine Masse. Und wenn bei einer chemischen Reaktion 'Energie freigesetzt' wird, geben die Reaktanten nach der Relativitätstheorie Substanz ab und verkleinern dabei ebenfalls nicht nur ihre Energie, sondern auch ihre Masse.

Wenn wir die Namen "Energie" und "Masse" weiterhin sowohl einem Eigenschaftshaber wie auch einer von dessen Eigenschaften zuordnen (anstatt die Eigenschaftshaber mit einem eigenen Namen zu bezeichnen), werden wir die tatsächlichen Verhältnisse den Schülern weiterhin nur schwer oder überhaupt nicht verständlich machen können. Was soll sich zum Beispiel ein Schüler denken, wenn ihm sowohl gesagt wird, daß Photonen (Lichtquanten) keine Masse haben, wie auch, daß Lichtstrahlen, die nahe an der Sonne vorbeigehen, von dieser aufgrund von Gravitationskräften aus der geraden Bahn abgelenkt werden (und damit doch wohl eine Masse haben müssen). Nur wenn gesagt wird, daß Photonen immaterielle Strahlungsportionen (also keine Materieportionen) sind und daß auch Strahlungsportionen eine Masse gemäß der Beziehung " $m = E/c^2$ " haben, wird der Sachverhalt der Ablenkung des Lichtes durch die Sonne verständlich.