

Plädoyer für die Abschaffung der Exergie

F. HERRMANN (Insitut für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe)

Die Aussage, Energie sei knapp und teuer, ist schwer zu verstehen, wenn man bedenkt, daß jeder uns umgebende Gegenstand oder Stoff gewaltige Mengen an Energie enthält. Und zwar nicht nur weil seine Temperatur höher als 0 K und sein Druck höher als 0 bar ist, sondern vor allem auf Grund seiner Ruhmasse, d.h. weil sein chemisches Potential sehr hohe Werte hat. Die Energie ist also sicher nicht knapp und teuer. Man hätte nun gern eine physikalische Größe, die dem entspricht, was man meint, wenn man sagt, die Energie sei knapp und teuer. Zu diesem Zweck wurde die Exergie erfunden. Sie stellt denjenigen Anteil der Energie dar, mit dem man "etwas anfangen" kann.

Bevor wir Argumente gegen die Einführung dieses Begriffs vorbringen, möchten wir kurz erklären, wie dieser Energieanteil definiert ist, von wessen Energie er überhaupt einen Teil darstellt.

Seit Carnot ist bekannt, daß ein System nutzbare Energie ("puissance motrice") abgeben kann, wenn sich im System ein Gleichgewicht einstellt. Es war Carnot sogar schon klar, daß chemische Reaktionen zu diesen Vorgängen gehören.

In moderner Sprache sieht das so aus: man hat zwei Teilsysteme 1 und 2. Die zugehörigen Gibbsschen Fundamentalformen sind

$$dE_1 = T_1 dS_1 - p_1 dV_1 + \mu_1 dn_1 + \dots$$

$$dE_2 = T_2 dS_2 - p_2 dV_2 + \mu_2 dn_2 + \dots$$

Läßt man sich zwischen den Teilsystemen alle Gleichgewichte (thermisches, Druck-, chemisches etc. Gleichgewicht) reversibel einstellen, so läuft ein Vorgang ab, bei dem die Änderungen der extensiven Größen aneinander gekoppelt sind:

$$dS_1 = -dS_2 = dS, \quad dV_1 = -dV_2 = dV$$

$$dn_1 = -dn_2 = dn \text{ etc.}$$

Das aus beiden Teilsystemen bestehende Gesamtsystem gibt dabei (nutzbare) Energie ab:

$$dE = d(E_1 - E_2) = (T_1 - T_2)dS - (p_1 - p_2)dV + (\mu_1 - \mu_2)dn + \dots$$

Diese Energie wird traditionell die abgegebene Arbeit genannt. Integriert man über diesen Ausdruck, so erhält man die Energie, die das System abgegeben hat.

Hat man nun irgendeine Einrichtung, die der Energiegewinnung dienen soll, so ist es oft das beste, was man machen kann, diese mit der Umgebung ins Gleichgewicht zu setzen. Eines der an dem Einstellvorgang beteiligten Teilsysteme ist also die Umgebung. Kennzeichnet man die Größen, die sich auf die Umgebung beziehen mit dem Index Null, und läßt die des anderen Teilsystems ohne Index, so ergibt sich für die Energie, die das aus beiden Teilsystemen zusammengesetzte System abgeben kann:

$$E = (T_0 - T)dS - (p_0 - p)dV + (\mu_0 - \mu)dn + (v_0 - v)dp + (\omega_0 - \omega)dL + (\varphi_0 - \varphi)dQ + \dots = Ex$$

Es ist nun dieser Energiebetrag, den man Exergie nennt. Es handelt sich bei dieser Größe um eine Zustandsfunktion. Allerdings hängt sie ab von Variablen beider Teilsysteme:

$$Ex = Ex(T, T_0, p, p_0, \mu, \mu_0, \dots)$$

Wir betrachten ein paar Beispiele:

1. Die Luft in einem Zylinder, Bild 1, befinde sich auf hohem Druck und Normaltemperatur. Die Exergie des Systems (Luft im Zylinder + Luft der Umgebung) berechnet sich zu:

$$Ex = \int_v^{V_c} (p - p_0) dV = (p_0 - p)V + nRT \ln \frac{p}{p_0} .$$



Bild 1

Man beachte, daß sich die Energie der Luft im Zylinder bei der isothermen Entspannung nicht ändert. Die Energie, die das System abgibt, kommt also vollständig aus der Umgebung.

2. Der Zylinder in Bild 2 ist evakuiert, der Druck im Zylinder ist also Null. Die Exergie des Systems (Vakuum im Zylinder + Luft der Umgebung) ergibt sich zu:

$$Ex = \int_V^0 (p - p_0) dV = p_0 V .$$

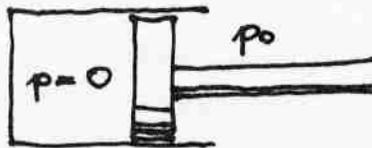


Bild 2

Wieder kommt die ganze abgegebene nutzbare Energie ausschließlich aus der Umgebung.

3. Wir bringen einen rollenden Wagen, Bild 3, mit der Erde ins Impulsgleichgewicht, indem wir ihn reversibel abbremsen. Für die Exergie erhalten wir, wie erwartet:

$$Ex = \int_v^0 (v_0 - v) dp = \frac{p^2}{2m} .$$

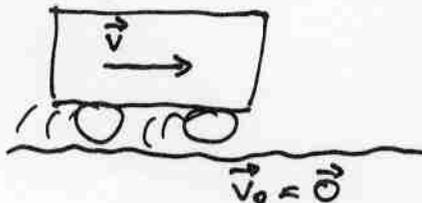


Bild 3

Obwohl die Begriffsbildung der Exergie keinen physikalischen Fehler enthält, möchten wir uns gegen die Einführung dieser Größe aussprechen, und zwar aus zwei Gründen.

1. Der sprachliche Umgang mit der Exergie ist schwieriger als der mit der Energie. Was den Umgang der Energie so leicht macht, ist ihr Mengencharakter. Man geht verbal mit der Energie um, wie mit einem Stoff. Hierzu gehört, daß man von ihr stets sagen kann, wo sie sich befindet. Bei der Exergie ist das nicht möglich. Sie ist nicht lokalisierbar. So kann man zwar im Fall der auf den Bildern 1 und 2 dargestellten Vorgänge notfalls noch von "der Exergie des Zylinders" sprechen, sicher aber nicht von der Exergie, die sich im Zylinder befindet. Das hat auch zur Folge, daß man nicht von einem Exergiestrom sprechen kann.

2. Führt man die Exergie statt der Energie ein, so errichtet man eine Reihe Hindernisse für den späteren Physikunterricht. Man wird ja die Exergie als eine Größe einführen, die für eine bestimmte Vorrichtung einen bestimmten Wert hat. Dabei unterstellt man, daß es auf die Frage, was man unter der Umgebung zu verstehen hat, eine eindeutige Antwort

gibt. Was ist aber die Umgebung? Man wird vielleicht zunächst vorschlagen: der Raumbereich, der das betrachtete System unmittelbar umgibt. Damit wird man aber dem Wunsch, der bei der Erfindung der Exergie Pate stand, sicher nicht gerecht. Es könnte ja sein, daß sich in nur wenig größerer Entfernung eine viel günstigere Umgebung befindet, also z.B. eine mit niedrigerer Temperatur. Wenn draußen die Lufttemperatur 20°C beträgt, ist dann die "Umgebungstemperatur" 20°C? Vielleicht ja. Aber wir könnten doch eine thermische Maschine auch zwischen hier und dem Äquator, oder zwischen hier und dem Nordpol, oder am Meer, zwischen den höheren und den tieferen Wasserschichten laufen lassen. Es wird aber noch komplizierter. Denn die 20°C bei uns sind ja nicht einmal in einer sehr engen Umgebung eine Gleichgewichtstemperatur: Am selben Ort, an dem sich die Luft befindet, befindet sich auch Strahlung, und zu allem Überfluß noch Strahlungen verschiedener Temperaturen. Das Licht von der Sonne hat 6000°C, die Strahlung anderer Richtungen Umgebungstemperatur. In großer Höhe schließlich haben wir noch die kosmische Hintergrundstrahlung von 3 K. Man sage nicht, es handele sich hier um kleine oder exotische Effekte. Jede Solarzelle, jeder Solarkollektor, jede Lichtmühle, aber auch alle Pflanzen profitieren von diesen Nichtgleichgewichten.

Entsprechende Probleme ergeben sich, wenn man nach dem Umgebungswert der anderen intensiven Größen fragt. Welches ist die Winkelgeschwindigkeit der Umgebung? Die der Erde wird man sagen. Durch Verlangsamung der Erdrotation ließe sich also keine Energie gewinnen? Jeder weiß, daß man es in dem bekannten Gezeitenkraftwerk in Nordfrankreich tut.

Besonders drastisch zeigt sich das Problem, wenn man nach dem Gleichgewichtswert der chemischen Potentiale fragt. Ist das chemische Gleichgewicht erreicht, wenn alle organische Materie verbrannt und aller Sauerstoff verbraucht ist? Sicher nicht, denn dann bleiben noch alle nicht abgelaufenen Kernreaktionen. Stabil sind bekanntlich die Kerne der Mitte des Periodensystems. Die leichten Kerne können bei Verwendung geeigneter Katalysatoren verschmolzen, die schweren gespalten werden. Wir werden also auch diese Nichtgleichgewichte bei der Berechnung der Exergie in Rechnung stellen müssen. So haben wir wenigstens die Ruhemasse von der Exergie ausgeschlossen. Aber oh weh, auch dazu haben wir kein Recht. Was wäre denn zum Beispiel, wenn uns ein Stern aus Antimaterie begegnete? Oder wenn man doch noch nachweisen würde, daß die Baryonenzahl nicht erhalten ist?

Der definitive Gleichgewichtszustand ist der, bei dem alle intensiven Größen im ganzen Universum einen konstanten Wert haben - eine metaphysische, oder besser, eine unsinnige Idee.

Wir fassen zusammen: Für die intensiven Größen der Umgebung, die man zur Berechnung der Exergie braucht, gibt es keine ausgezeichneten Werte. Die Welt ist voll von Nichtgleichgewichten. Jede Einstellung eines Gleichgewichts kann zur Energiegewinnung genutzt werden. Manche Gleichgewichte lassen sich leicht einstellen, andere mit größerem Aufwand. Es gibt daher auch nicht zwei Sorten Energie, die wertvolle und die wertlose. Es gibt vielmehr Energie beliebig unterschiedlichen Wertes.

Ist das nicht schade? Man hatte doch mit der Einführung der Exergie eine vernünftige Idee verfolgt? Nein, es ist nicht schade, denn die Tatsache, daß es mehr oder weniger umständlich ist, einem System seine Energie abzunehmen ist wahrhaftig nicht schwer zu begreifen und auch einem Anfänger zuzumuten.