

Energie als grundlegendes Konzept

Hans Joachim Schlichting und Udo Backhaus

Das durch das ambivalente Verhältnis von Erhaltung und Verbrauch gekennzeichnete lebensweltliche Energiekonzept bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Skizze eines Unterrichtsganges, in dem die Eigenschaft der Erhaltung zum quantitativen (physikalischen) Energiekonzept verschärft wird. Im Unterschied zum üblichen Vermittlungsschema Kraft → Arbeit → Energie wird die Energie als Grundgröße eingeführt. Entlang des Energiekonzepts als Leitidee werden sodann ansonsten relativ unverbunden nebeneinander bestehende Phänomenbereiche erschlossen und miteinander verknüpft. Die Verfasser versprechen sich von diesem Vorgehen nicht nur eine Vereinfachung der Sachstruktur, sondern darüber hinaus die Chance, Voraussetzungen für eine sachlich begründete Einschätzung der Energieproblematik zu schaffen.

1 Einleitung

Die Energie hat sich seit ihrer Einführung in der Mitte des vorigen Jahrhunderts [1] zu einem zentralen naturwissenschaftlichen Konzept entwickelt. In dem Maße, wie der Einsatz von Energiehilfsquellen Eingang in fast alle menschlichen Lebensbereiche gefunden und durch die drohende Erschöpfung fossiler Energieträger eine zusätzliche Aktualisierung erfahren hat, ist der Energiebegriff in die Umgangssprache abgesunken und mit lebensweitlichem Inhalt gefüllt worden.

Die gängigen deutschen Schulbücher tragen der dadurch begründeten Bedeutung der Energie kaum Rechnung. Im üblichen Vermittlungsschema Kraft → Arbeit → Energie erscheint die Energie als abgeleitete Größe meist nur am Rande der Mechanik.

Fachwissenschaftliche, lerntheoretische und politisch-gesellschaftliche Überlegungen sprechen indessen dafür, die Energie als Grundgröße einzuführen [2].

Wir halten es deshalb für vorteilhaft, nicht die Energie aus anderen Größen abzuleiten und zu verstehen, sondern plädieren dafür, gegebenenfalls die anderen Größen auf die Energie zurückzuführen und aus ihr zu verstehen.

Die Wahl einer bestimmten Grundgröße wird La. durch eine entsprechende lebensweltliche Basis nahegelegt. Diese Basis ist ebenso wie bei umgangssprachlichen Begriffen (etwa Liebe und Gerechtigkeit) das Ergebnis eines mehr oder weniger intensiven Umgangs mit Vorgängen, in denen sich das fragliche Konzept in den verschiedensten Zusammenhängen manifestiert und auf diese Weise eingeübt und vertraut wird.

Die Energie gehört zu jenen Termini, die im Unterschied etwa zur ‚Kraft‘ und ‚Arbeit‘ ohne problematischen Bedeutungswandel in der Lebenswelt vorkommen. Der ‚Nichtfachmann‘ besitzt daher eine durchaus zutreffende Anschauung“ der Energie, ‚von der er meist den richtigen Gebrauch macht‘ [3].

Daher kann man den Unterricht i.a. darauf beschränken (Kap. 2), einen phänomenologischen Energiebegriff aus der vorwissenschaftlichen Erfahrungswelt der Schüler herauszupräparieren, zu präzisieren, zu systematisieren und dabei

- die Energie als etwas sehr Konkretes erfahrbar zu machen.

Durch Experimente ist sodann zu zeigen, daß

- Energie in verschiedenen Arten auftritt, die ineinander umgewandelt werden können.

Schließlich soll

- aus den Energieumwandlungen die Vorstellung der Energieerhaltung entwickelt werden.

Das Prinzip der Energieerhaltung (Energieprinzip) bildet den Leitgedanken für das weitere Vorgehen (Kap. 3 und 4):

- Die Energie wird an Hand einer für diese Zwecke besonders geeigneten Energieart quantifiziert, also operational definiert.
- Die Definition der anderen Energiearten wird im Anschluß daran so vorgenommen, daß die phänomenologisch nahegelegte Vorstellung der Energieerhaltung erfüllt wird.

Die Erfahrung zeigt, daß das möglich ist.

Das Heranziehen der Erhaltungsvorstellung bei der Entwicklung von Meßverfahren ist keine Besonderheit des hier vorgeschlagenen Vorgehens. Im Gegenteil: es gibt gar keine andere Möglichkeit, zu Ausdrücken für die verschiedenen Energiearten zu kommen, wenn erst einer davon festgelegt ist. Der Unterschied zu üblichen Vorschlägen liegt vielmehr darin, daß dieser Umstand bewußt gemacht wird.

In der vorliegenden Arbeit wählen wir die elektrische Energie als Ausgangspunkt.

2. Zur phänomenologischen Behandlung der Energie

Eine der wesentlichen Eigenschaften, die die Energie im vorwissenschaftlichen Verständnis besitzt, ist in ihrer Hilfsfunktion für den Menschen zu sehen: Mit Energie kann man etwas anfangen.

Für den Unterricht in der Sekundarstufe 1 bietet sich als Einstieg an, die Hilfsfunktionen bzw. „Wirkungen“ der Energie für konkrete Energiequellen zu ermitteln (siehe Tabelle). Es wird den Schülern i. a. keine Schwierigkeiten bereiten zu erkennen, daß beispielsweise

- elektrisch betriebene Vorrichtungen
- Kaffeewasser erwärmen,
- eine E-Lok bewegen,
- eine Glühlampe zum Leuchten bringen (etc.) können,
- Benzin
- ein Auto bewegen,
- leuchten,
- Wasser verdampfen (etc.) kann.

Tabelle

Energiesystem Wirkung

Elektr. Vorrichtung	erwärmen	bewegen	erleuchten	schmelzen
Benzin	erwärmen	bewegen	erleuchten	schmelzen
Mensch	erwärmen	bewegen		
Sonne	erwärmen		erleuchten	schmelzen

Es zeigt sich, daß verschiedene Systeme zu gleichen Wirkungen in der Lage sind. An Hand einer Matrix, in der man die verschiedenen Systeme gegen die einzelnen Wirkungen aufträgt, läßt sich dieser Gedanke in zwei Richtungen weiter exemplifizieren:

- zu gleichen Systemen werden verschiedene Wirkungen,

- zu gleichen Wirkungen werden verschiedene Systeme gesucht.

Dadurch wird nahegelegt, den verschiedenen, zu gleichen Wirkungen fähigen Systemen eine gemeinsame Eigenschaft zuzuschreiben. Diese gemeinsame Eigenschaft wird Energie genannt bzw. als dasjenige identifiziert, was man gemeinhin meint, wenn man von Energie spricht. Man kommt somit zur folgenden vorläufigen Definition:

Diejenigen Systeme (Benzin, Sonne, Mensch, Batterie etc.), die etwas

- erwärmen,
- verbrennen,
- zum Leuchten bringen,
- bewegen,
- verformen (etc.) können, besitzen Energie.

Diese Definition stellt eindeutig auf den Gesichtspunkt der Energiespeicherung (Energie als Speicherform) ab. Damit aber Energie sich überhaupt (in spezifischen Wirkungen) zu manifestieren vermag, muß sie vom energiespeichernden System abgegeben werden. Bei allen Phänomenen, aus denen die Definition gewonnen wurde, tritt also der Aspekt des Energietransports in Erscheinung (Energie als Transportform) [4].

So wichtig die Differenzierung der Energie nach Speicher- und Transportform auch sein mag, so wenig empirisch dürfte sie in diesem Stadium der Konzeptualisierung für die Schüler sein. Entsprechende Hinweise zu geben, liefe auf eine Vorgabe hinaus und würde die Schüler der Möglichkeit berauben, den Energietransport aus einer tiefergehenden Analyse der Phänomene zu erarbeiten (siehe unten). Indessen darf nicht übersehen werden, daß obige Definition nur dann korrekt ist, wenn die jeweilige Energiequelle mit zum System gerechnet wird. Im Falle von batteriebetriebenen Geräten etwa liegt diese Voraussetzung auf der Hand, bei netzabhängigen Geräten dürfte die Hinzunahme des Kraftwerkes samt Kohlehalden ziemlich konstruiert wirken.

Was hier zum Vorschein kommt, ist die aus der Thermodynamik bekannte Problematik der Systemgrenzen. Da den Schülern darüber hinaus in diesem Stadium das entsprechende Problembewußtsein fehlt, halten wir es für gerechtfertigt, auch dann vorläufig mit der obigen Definition zu arbeiten, wenn Systeme im Spiel sind, bei denen die Schüler mit Sicherheit nicht die entsprechenden Energiequellen hinzurechnen würden (z.B. beim Staubsauger).

Verfügen die Schüler erst einmal über den Speicher- *und* Transportaspekt der Energie, so erweist sich die Definition ohnehin als überwunden. Bis dahin stellt sie aber eine brauchbare Stütze dar [5].

Zur Konkretisierung des vorläufigen Energiebegriffes bietet es sich an, möglichst viele verschiedene Beispiele zu diskutieren und entsprechende Experimente durchzuführen.

Dabei kann es hilfreich sein, im Anschluß an die obige Definition Formulierungen der folgenden Art zu verwenden:

- eine (brennende) Kerze besitzt Energie,
- weil man mit ihr - Wasser erwärmen
- ein Zimmer erleuchten kann,
- der Mensch besitzt Energie,
- weil er sich bewegen,
- mit seinem Körper etwas erwärmen,
- eine Uhr aufziehen kann,
- eine aufgezogene Uhr besitzt Energie,
- weil sie die Zeiger bewegen kann,

etc.

2.1. Energieumwandlungen

Aus den Beispielen sollte u.a. erkennbar werden, daß zwischen manchen der diskutierten Vorgänge Verkettungen der folgenden Art bestehen: Systeme, die bislang als Indikator dafür angesehen wurden, daß ein anderes System Energie besitzt, verfügen offenbar selbst über Energie. Denn sie sind in der Lage, an einem dritten System entsprechende Wirkungen hervorzurufen. Im obigen Beispiel manifestiert sich die Muskelenergie des Menschen im Spannen der Uhrfeder. Die Uhrfeder wird durch das Spannen ihrerseits befähigt, die Uhrzeiger zu bewegen.

Es lassen sich zahlreiche Beispiele finden, in denen noch längere Energieketten auftreten. Das folgende Beispiel ließe sich ohne großen Aufwand experimentell realisieren:

- ein Campinggasbrenner bringt Wasser zum Verdampfen,
- der Dampf betreibt eine (Spielzeug)-Dampfmaschine,
- die Dampfmaschine betreibt einen Dynamo,
- der Dynamo bringt eine Glühlampe zum Leuchten.

Es liegt nun fast auf der Hand, derartige Vorgänge durch einen Übergang der Energie von einem System zum anderen zu beschreiben bzw. von einem Energiefluß durch die aneinandergekoppelten Systeme zu sprechen. Energie erscheint demnach als eine Art Fluidum, das unter bestimmten Bedingungen zwischen verschiedenen Systemen ausgetauscht wird. So gesehen läßt sich das letzte Beispiel folgendermaßen interpretieren: Indem das (Camping)-Gas verbrennt, also seine chemische Zusammensetzung ändert, gibt es seine chemisch gespeicherte Energie ab. Diese tritt dann als thermische Energie des Wassers auf. Das (dampfförmige) Wasser ist dadurch in die Lage versetzt worden, eine Dampfmaschine zu betreiben, d.h. seine thermische Energie [4] in mechanische (Bewegungs-)Energie der Dampfmaschine zu verwandeln. Die Bewegungsenergie der Dampfmaschine wird sodann durch den Dynamo in elektrische Energie und schließlich über den Glühdraht der Lampe in Licht und Wärme umgesetzt. Da sich die Energie dabei auf unterschiedliche Weise manifestiert, spricht man von Energieumwandlungen einer Energieart [6] in eine andere. Die bekanntesten Energiearten sind

- Bewegungsenergie,
- thermische Energie,
- chemische Energie,
- elektrische Energie [7],
- Lageenergie.

Unterbricht man eine derartige Kette aneinandergekoppelter Systeme an einer Stelle, so kommt der jeweils ablaufende Prozeß (im obigen Beispiel: Verbrennung von Gas-Leuchten der Glühlampe) zum Stillstand. Diese Beobachtung ist geeignet zu demonstrieren, daß viele Systeme weniger die Eigenschaft besitzen, Energie zu speichern als die Eigenschaft, Energie weiterzugeben bzw. zu transportieren oder von einer Art in eine andere umzuwandeln. Im allgemeinen ist nur das Anfangsglied der aneinandergekoppelten Systeme als Energiespeicher anzusehen (z.B. Benzin, Kohle, Lebensmittel, Batterien).

Dadurch erfährt unsere vorläufige Definition der Energie eine weitergehende Differenzierung. Im folgenden muß der Unterricht darauf abgestellt werden, das Strukturmerkmal Energieumwandlung durch Beispiele (Tabellierung, Flußdiagrammdarstellung) und einfache Experimente einzuüben. Dabei sollte auf eine deutliche Abgrenzung zwischen Speicher- und Transportarten der Energie geachtet werden [4]. Viele Lernschwierigkeiten, die bei einer späteren quantitativen Behandlung der Energieumwandlungen im Zusammenhang mit Zustandsfunktionen, Arbeit, Wärme, vollständiges und unvollständiges Differential auftreten, sind meist auf eine Verwechslung der Speicher- und Transportarten zurückzuführen.

2.2. Energieerhaltung: Energie bleibt erhalten; sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden!

Die Energieumwandlungen legen die Vorstellung nahe, die Energie sei eine Art unzerstörbarer Stoff. Demnach sollte es unmöglich sein, Energie zu erzeugen und zu vernichten. In der Tat lässt sich den Systemen, die gespeicherte Energie abgeben, i.a. ansehen, daß sich ihr Energieinhalt erschöpft. Die oben erwähnte Campinggaskartusche wird ebenso leer wie der Tank eines fahrenden Pkw's. Auch der Mensch vermag nur begrenzte Zeit Energie etwa in Form von Muskelarbeit abzugeben. Mit den Nahrungsmitteln nimmt er immer wieder neue Energie zu sich.

Indessen liegt die Unmöglichkeit der Energievernichtung nicht unmittelbar auf der Hand. Eine fundamentale vorwissenschaftliche Erfahrung, die im Zusammenhang mit der Energie gemacht wird, ist im Energieverbrauch zu sehen. Durch Schlagworte wie Energieverschwendungen, Energiekosten, Energiekrise u.ä. wird die Möglichkeit der Energievernichtung geradezu suggeriert.

An dieser Stelle kommt das Konzept der Energieentwertung ins Spiel. Wenn zu diesem Zeitpunkt auch noch nicht an quantitative Versuche zu denken ist, so ist zumindest qualitativ der Nachweis zu führen, daß Energie letztlich in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Die Schüler sollten dabei die Einsicht gewinnen, daß Energie in gleicher Weise verbraucht wird, wie etwa Mehl, wenn man daraus einen Kuchen backt: nicht die Quantität wird verändert, sondern die Qualität. Die Erkenntnis, daß Energie außer erhalten zu sein, entwertet werden kann, eröffnet eine Möglichkeit zur Behandlung des Entropiebegriffs [8].

3. Die Messung der Energie

Bislang verfügen wir nur über einen qualitativen Energiebegriff. Zu einem quantitativen Konzept gelangt man durch die Angabe einer Methode, wie die Energie zu messen ist. Diese sogenannte operative Definition der Energie lässt sich nicht aus der Erfahrung deduzieren, sie erfolgt durch "freie Setzung". Ob eine Meßmethode "richtig" ist, kann an sich nicht festgestellt werden. "Die Meßmethode ist nur daran zu prüfen, ob sie in sich konsistent ist, d.h. ob die benutzten physikalischen Vorgänge tatsächlich so sind, wie sie bei der Verwendung während des Messens vorausgesetzt wurden" [9]. Man kann natürlich nur dann etwas voraussetzen, wenn man wenigstens ein qualitatives Verständnis von den Vorgängen besitzt. Bei der Energie ist dies die phänomenologisch erworbene Vorstellung der Energieerhaltung und der Mengenartigkeit. Das Konzept der Energie ist dann brauchbar, wenn unter dieser Voraussetzung die Messungen in sich konsistent sind [10]. Wie an anderer Stelle ausführlich dargelegt wurde [11], ist es üblich, eine physikalische Größe durch die Angabe von

- Gleichheit,
- Vielfachheit und
- Einheit zu definieren.

Die Festlegung der Gleichheit bereitet La. keine Schwierigkeiten. Es liegt nahe, die einem System auf zwei verschiedene Weisen übertragene Energie als gleich anzusehen, wenn in beiden Fällen die gleichen Wirkungen, also die gleichen Veränderungen am System hervorgerufen werden.

Um die Mengenartigkeit der Energie zu konstituieren, legt man die Vielfachheit in der folgenden Weise fest:

Eine Energie E_n ist n mal so groß wie eine Energie E_1 , wenn durch E_n an n gleichen Systemen dieselbe Veränderung hervorgerufen wird, wie durch E_1 an einem von ihnen unter sonst gleichen Bedingungen. Eine Normvariation der jeweiligen Meßgröße dient zur Festlegung der Einheit. Die Einheit der Energie ist gemäß internationaler Übereinkunft das Joule.

3.1. Diskussion konkreter Realisierungen

Im Prinzip sind alle Energieumwandlungen als Einführungsparadigma geeignet. Praktisch hat man sich auf jene Umwandlungen zu beschränken, bei denen vertraute Größen wie Höhe, Temperatur, Auslenkung einer elastischen Feder, Geschwindigkeit, Masse, Umdrehungszahl eines Elektrizitätszählers variiert werden; d.h. für die Schule

kommen i.w. nur die kinetische, potentielle (Hubenergie, elastische Verformungsenergie), elektrische, thermische und chemische Energie in Frage.

Für die potentielle Energie (E_{pot}) spricht die einfache Abhängigkeit von Lage h und Gewichtskraft G . Dabei legt man i.a. $\Delta E_{pot} := G \Delta h$ fest und schließt durch die bekannten Experimente (z.B. Fahrbahnexperimente) unter Ausnutzung der Energieerhaltung die Definition der kinetischen Energie an: $\Delta E_{pot} := \Delta E_{kin}$, Gegen die potentielle Energie als Einführungsparadigma ist einzuwenden, daß die mechanischen Versuche i.a. stark von allen Umweltbezügen befreit werden müssen. Die dadurch bedingte Fiktivität [12] läuft unserer Intention, von der Lebenswelt auszugehen, stark entgegen. Hinzu kommt das Problem, daß einem hochgehobenen Körper nicht anzusehen ist, daß seine Energie sich geändert haben soll [13].

Im übrigen spricht eine gewisse Konventionalität gegen die potentielle Energie als Einführungsparadigma: der Ausgangspunkt wäre wieder einmal die Mechanik. Das könnte dem übergeordneten Ziel, die Universalität der Energie zum Ausdruck zu bringen, abträglich sein.

Eine ähnliche Würdigung trifft für die kinetische Energie zu. Eine zusätzliche Komplikation ist in der quadratischen Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [14] zu sehen.

Im Unterschied dazu spricht für die elektrische Energie die vorwissenschaftliche Vertrautheit. Der Zähler als Meßgerät für elektrische Energie ist weitgehend bekannt und wird ähnlich unhinterfragt verwendet wie etwa die Uhr zur Zeitmessung. Ein möglicher Nachteil, daß Begriffe der Elektrizitätstheorie bereits zu einem Zeitpunkt benötigt werden, da diese lehrplanmäßig noch nicht behandelt wurden, erweist sich als weniger gravierend, als er zunächst erscheint. Alle genannten Energiearten als Einführungsparadigma haben den Nachteil, daß sie abgesehen von einer Umwandlung in thermische Energie praktisch nicht quantitativ durchführbar sind. Weder läßt sich elektrische Energie mit den verfügbaren Motoren auch nur annähernd ohne gleichzeitige Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung in potentielle oder kinetische verwandeln, noch ist potentielle oder kinetische Energie mit den verfügbaren Generatoren vollständig in elektrische Energie überführbar [15].

Aber alle Energiearten gehen vollständig in thermische Energie über. Es wäre daher naheliegend, die thermische Energie als Einführungsparadigma zu wählen und die übrigen Energiearten dadurch anzuschließen, daß man sie in thermische Energie verwandelt. Ein Nachteil ist u.E. allerdings darin zu sehen, daß thermische Energie in den entsprechenden Experimenten jeweils das Umwandlungsprodukt darstellt [16]. Man hätte also die verschiedenen Energiearten dadurch an die thermische Energie anzuschließen, daß man feststellt, wieviel thermische Energie während der Umwandlung entsteht. Zumindest die erste Umwandlung sollte der Einfachheit halber in einer Oberführung einer definierten Menge der Ausgangsenergieart in die entsprechende Produktenergieart bestehen. Hinzu kommt, daß die entsprechenden kalorimetrischen Experimente sich nicht gerade durch lebensweltliche Vertrautheit auszeichnen, was unserer eingangs erhobenen Forderung, möglichst von einem lebensweltlich geprägten Vorverständnis auszugehen, widerspricht. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile schlagen wir vor, die elektrische Energie als Einführungsparadigma zu benutzen.

4. Die elektrische Energie als Einführungsparadigma

Im Zusammenhang mit der Präzisierung des vorwissenschaftlichen Energiekonzepts sollte durch entsprechende Versuche u.a. deutlich geworden sein, daß elektrische Geräte (Verbraucher) Energie abgeben. Auf der Suche nach einem Meßverfahren könnte man z.B. Wasser mit verschiedenen Tauchsiedern erwärmen. Dabei mißt man bei gleicher Temperaturerhöhung immer die gleiche Drehzahl am Zähler [17]. Damit hat man gezeigt, daß die Drehzahl ein - noch nicht notwendig proportionales - Maß für die hindurch geflossene Energie darstellt, sie insbesondere nicht vom speziellen Verbraucher abhängt.

Daraus folgt:

Zwei elektrische Energiemengen sind gleich, wenn an demselben Zähler die gleiche Umdrehungszahl hervorgerufen wird.

Durch Parallelschaltung von n verschiedenen Verbrauchern, die alle dieselbe Wirkung hervorrufen, stellt man fest, daß sich der Zähler n mal so oft gedreht hat, wie wenn *ein* Verbraucher *eine* dieser Wirkungen erzielt hat. Diese Wirkungen können z.B. die Erwärmung zweier gleicher Wassermengen oder die elektrolytische Abscheidung zweier gleicher Mengen Sauerstoff in zwei Hofmannschen Apparaten sein.

Dadurch wird gezeigt, daß die abgegebene Energie proportional zur Umdrehungszahl des Zählers ist, so daß aus der allgemeinen Vielfachheitsfestlegung (siehe Kap. 3.) folgt:

Eine elektrische Energie E_n ist n mal so groß wie eine Energie E_1 , wenn sie in einem Zähler die n -fache Umdrehungszahl hervorruft wie E_1 in demselben Zähler. Die Einheit der neuen Meßgröße ist gemäß internationaler Übereinkunft das Joule'. Wenn durch den (in unseren Experimenten zugrunde gelegten) Normzähler 1 Kilojoule fließt, dreht er sich 1 mal [18].

Im Sinne einer weiteren Vereinfachung wäre es auch möglich gewesen, die elektrische Energie nicht aufgrund der allgemeinen Definition (Kap. 3.) einzuführen, sondern mit der daraus abgeleiteten obigen Vorschrift als Festlegung zu beginnen. Dann hätten allerdings die Versuche keinen Nachweiswert für die Proportionalität zwischen Energie und Umdrehungszahl, sondern allenfalls die Funktion, das darauf beruhende Meßverfahren nahezulegen.

4.1. Umgang mit der elektrischen Energie

Mit dieser formalen Einführung ist lediglich die quantitative Basis dafür gegeben, in eindeutiger Weise von elektrischer Energie reden und mit ihr umgehen zu können. Das Verständnis muß sich dagegen in Verbindung mit den phänomenologisch entwickelten Anschauungen aus weiterem Umgang' mit der Energie ergeben. Verständnis heißt zunächst einmal, ein Gefühl für die Größenordnung der bei typischen Vorgängen umgesetzten Mengen elektrischer Energie zu erlangen. Das kann beispielsweise dadurch geschehen, daß man typische Hilfsfunktionen elektrischer Energie hinsichtlich ihres Energiebedarfs untersucht: Welcher Energie bedarf es, um mit einem Tauchsieder das Kaffeewasser zu bereiten, mit einem Fön die Haare zu trocknen, ein Konzert im Radio zu hören, ein Zimmer mit dem Staubsauger zu säubern, mit dem Geschirrspüler eine Runde Geschirr zu spülen?

Diese Versuche kann man Schüler als Hausarbeit durchführen lassen.

Ober die Erfassung des täglichen, wöchentlichen oder jährlichen Bedarfs an elektrischer Energie eines typischen Haushaltes, aller Haushalte des Wohnortes, des Staates etc. läßt sich bereits eine vorläufige Einordnung globaler Energieströme erreichen.

Obwohl dieses Vorgehen sich nicht durch besondere Originalität auszeichnet, garantiert der unmittelbare Bezug zum Alltag des Schülers und der hohe Anteil eigener Aktivitäten i.a. eine relativ hohe Motivation [19].

Verständnis für die Energie zu gewinnen, heißt darüber hinaus auch, einzusehen, daß verschiedene Geräte i.a. unterschiedlich viel Energie umsetzen. An dieser Stelle bietet es sich an, am Beispiel der elektrischen Energie den Begriff der Leistung zu erarbeiten. Durch einfache Versuche läßt sich die Vermutung bestätigen, daß die Energieaufnahme proportional zur Betriebszeit ist. Die Proportionalitätskonstante ist die Leistung, eine zur Charakterisierung des Energieflusses (Energie/Zeit) geeignete Gerätekonstante [20].

4.2. Die Umwandlung der elektrischen Energie

Die Berechtigung, mit der die quantitative Betrachtung bislang auf die elektrische Energie beschränkt wurde, ergibt sich lediglich aus der Tatsache, daß für elektrische Energie ein Meßverfahren vorliegt. Im Unterschied zur obigen (Kap. 2.) phänomenologisch - qualitativen Diskussion der Energie, in der es darum ging, an das Vorwissen anzuknüpfen und wesentliche Merkmale wie Universalität, Erhaltungseigenschaft herauszuarbeiten, sollte hier zunächst Bekanntschaft mit der quantitativen Seite einer speziellen Manifestation der Energie, nämlich durch elektrische Phänomene, gemacht werden. Deshalb interessierte zunächst nicht, was aus der elektrischen Energie wurde. Sie wurde verbraucht, so wie Mehl verbraucht wird, wenn daraus ein Kuchen gebacken wird (siehe oben). Aus der phänomenologischen Behandlung der Energie weiß man bereits, daß sich hinter dem ‚Verbrauchen‘ die

Umwandlung in eine andere Energieart verbirgt: der Fön verwandelt elektrische Energie in mechanische und thermische Energie, das Radio wandelt elektrische Energie in akustische und Lichtenergie etc.

Im folgenden sollen diese Umwandlungen quantitativ betrachtet werden, d.h. unter Ausnutzung des Prinzips der Energieerhaltung sollen die aus der elektrischen Energie entstandenen ‚Produktenergiearten‘ quantifiziert und gemessen werden.

4.2.1. Energieumwandlung: Elektrische Energie → thermische Energie

Mit Hilfe von elektrischer Energie lässt sich eine Temperaturerhöhung produzieren, indem man z.B. einen Tauchsieder in eine Wassermenge eintaucht. Diese Erwärmung ist aufgrund des jetzt vorhandenen Verständnisses als Ausdruck des zunehmenden Energieinhalts des Wassers anzusehen: Elektrische Energie ist in thermische Energie des Wassers umgewandelt worden. Durch Messung der dabei übertragenen Energie ΔE_{el} , und der Temperaturerhöhung ΔT stellt man (in einem weiten Bereich) Proportionalität zwischen ΔE_{el} und ΔT fest.

Setzt man die phänomenologisch erworbene (siehe Kap. 2.2.) Überzeugung voraus, daß bei dieser Umwandlung die Energie quantitativ erhalten bleibt, so gilt:

$$\Delta E_{th} := \Delta E_{el} = C \Delta T. \quad (1)$$

D.h., die aus der elektrischen Energie hervorgegangene thermische Energie ist proportional zur Temperaturerhöhung des erwärmten Systems.

Diese Energieumwandlung ist die einzige, die ohne großen Aufwand ‚verlustfrei‘ durchgeführt werden kann. Denn alle Energiearten gehen schließlich in thermische Energie über. Die bei jedem Vorgang unvermeidbaren sogenannten Dissipationsverluste sind nichts anderes als die Umwandlung eines Teils der Energie in thermische Energie.

Die Definition der thermischen Energie ist zwar eine Festlegung. Sie ist aber die einzige, die mit dem Prinzip der Energieerhaltung verträglich ist. Auf der Grundlage des phänomenologischen Vorverständnisses versteht man den Vorgang anschaulich so, daß die elektrisch hineingeflossene Energie jetzt im Wasser steckt und sich in der Erwärmung manifestiert. Um die operationale Definition noch stärker an das Vorverständnis anzubinden, bietet es sich an, durch entsprechende Versuche ein Gefühl für die umgesetzten Quantitäten zu erlangen. Im Prinzip kann an dieser Stelle beliebig viel Wärmelehre angeschlossen werden. Mindestens sollte aber die Proportionalitätskonstante C , die Körperkonstante ‚Wärmekapazität‘, konstituiert werden [21].

Eine erste Konsistenzprüfung ist an Hand der aus der Wärmelehre bekannten Mischungsversuche möglich. Mischt man beispielsweise zwei gleiche Mengen Wasser unterschiedlicher Temperatur T_1 und T_2 , so ermittelt man eine Mischtemperatur $T_m = (T_1 + T_2) / 2$. Die Messung von T_m zeigt, daß die in Gleichung (1) definierte thermische Energie (bei kalorischen Messungen) eine Erhaltungsgröße ist. Denn das Wasser mit der Temperatur $T_1 > T_2$ gibt die Energie $\Delta E_1^{th} = -C (T_1 + T_m) = -C (T_1 + T_2) / 2$ an das Wasser mit der Temperatur T_2 ab, welches dadurch einen Energiezuwachs von $\Delta E_2^{th} = C (T_m - T_2) = C (T_1 + T_2) / 2$ erfährt. Die Gesamtänderung der Energie $\Delta E^{th} = \Delta E_1^{th} + \Delta E_2^{th}$ ist daher gleich Null.

Damit erfahren diese wegen ihrer einfachen quantitativen Durchführbarkeit beliebten Versuche eine interessante zusätzliche Motivation. Es sollte allerdings nicht übersehen werden, daß diese Konsistenzprüfung auf die thermische Energie beschränkt ist und über die Existenz eines allgemeinen Energiebegriffs keine Aussage macht.

Die Behandlung der thermischen Energie vor den mechanischen Energiearten hat den nicht zu überschätzenden Vorteil, daß die Schüler im folgenden die sog. Energieverluste (z.B. Reibung) als auftretende Umwandlungen in thermische Energie deuten und zum Teil nachweisen können und nicht auf Vorgaben angewiesen sind.

4.2.2. Energieumwandlung. Elektrische Energie - potentielle Energie

Im Prinzip können die anderen Energiearten nach dem obigen Schema im Anschluß an die elektrische Energie definiert werden. Deswegen soll nur noch exemplarisch die Umwandlung in die potentielle Energie E_{pot} erörtert werden.

An diesem Beispiel wird der Festlegungscharakter der Energieerhaltung besonders deutlich. Einem gehobenen Körper sieht man nämlich nicht an, daß er genau um so viel mehr an potentieller Energie besitzt wie an elektrischer Energie durch den Zähler geflossen ist [22], der etwa dem als Aufzug dienenden Elektromotor vorgeschaltet ist.

Andererseits haben wir es bei diesem Beispiel mit einem für alle nicht-thermischen Energieumwandlungen typischen Problem zu tun: mit den in einer Schulsammlung üblicherweise zur Verfügung stehenden Geräten, in diesem Fall Elektromotoren, lassen sich i.a. keine Energieumwandlungen demonstrieren, bei denen die Abweichung von der (prinzipiell möglichen) vollständigen Umwandlung durch die in solchem Fall gern strapazierte Meßungenauigkeit glaubwürdig wegdiskutiert werden kann [23].

Man hat jetzt mehrere Möglichkeiten fortzufahren.

- Den Schülern wird mitgeteilt, daß bei diesem Versuch wegen technischer Unzulänglichkeiten Reibungs- und andere Dissipationsverluste auftreten, also ein Teil der elektrischen Energie in unkontrollierbarer Weise als Wärme an die Umgebung abgegeben wird (Feststellen durch Anfassen). Um zu konsistenten Ergebnissen zu kommen, hat man diese Verluste durch einen Faktor 17, den Wirkungsgrad des Motors, in Rechnung zu stellen:

$$\Delta E_{pot} := \eta \Delta E_{el}, \quad (2)$$

Da η bei fester Drehzahl i.a. konstant ist, erhält man auch so die Proportionalität zu Δh ; und bei Vorgabe des Zahlenwertes von η kann man sogar den Proportionalitätsfaktor G , die Gewichtskraft des gehobenen Körpers, bestimmen [24].

- Die Schüler werden im Glauben gelassen, daß eine vollständige Umwandlung von elektrischer Energie in potentielle Energie erfolgt. Nach dem gleichen Schema der Einführung der thermischen Energie kommt man (konstante Dissipationsverluste unterstellt) zu

$$\Delta E_{pot} := \Delta E_{el} = G^* \Delta h. \quad (3)$$

Allerdings ist G^* nicht die Gewichtskraft G des gehobenen Körpers, sondern $G^* = \eta G$. Die spätere Konsistenzprüfung durch Umwandlung der so definierten potentiellen Energie in thermische Energie oder elektrische Energie muß dann zwangsläufig negativ ausfallen und kann zum Anlaß genommen werden, die Dissipationsverluste zu diskutieren.

Im ersten Vorschlag werden große Vorgaben gemacht. Es besteht die Gefahr, daß dadurch die Eigeninitiative der Schüler und die Motivation eingeschränkt werden.

Der zweite Vorschlag ist weitgehend auf die Fähigkeiten der Schüler angewiesen, die Logik des bisherigen Vorgehens konsequent durchzuhalten. Immerhin sollen die Schüler schließlich erkennen, daß man auf diese Weise zu keinem konsistenten Energiebegriff kommt, indem z.B. bei der Rückverwandlung der so definierten potentiellen Energie in elektrische (etwa unter Benutzung des Motors als Generator) eine starke quantitative Abweichung von der Ausgangsenergiemenge festgestellt wird.

Dieses Vorgehen kann wissenschaftstheoretisch außerordentlich interessant sein. Es demonstriert nämlich, daß es mit der bloßen Festlegung einer Größe noch nicht getan ist. Sie muß darüber hinaus so beschaffen sein, daß ihre Verwendung zu keinen Inkonsistenzen führt. So wichtig die damit verbundenen übergeordneten Lernziele auch sein mögen; an dieser Stelle, bevor ein klares Energiekonzept vorliegt, scheint uns eine derart massive Reflexion des eigenen Vorgehens und der Begriffsbildung kaum möglich zu sein.

Eine Alternative bietet sich an, wenn man unter Ausnutzung der Möglichkeit, potentielle Energie vollständig in thermische Energie umsetzen zu können, umgekehrt vorgeht: Man verwandelt in einem der bekannten klassischen

Versuche [25] die potentielle Energie eines herabsinkenden schweren Körpers in thermische Energie, die man jetzt nach ihrer oben beschriebenen Einführung direkt messen kann. Setzt man gemäß dem Energieprinzip

$$\Delta E_{\text{pot}} := \Delta E_{\text{th}} \quad (4)$$

und benutzt den empirischen Befund

$$\Delta E_{\text{pot}} \sim \Delta h, (h = \text{Höhe})$$

so erhält man

$$\Delta E_{\text{pot}} = G \Delta h, \quad (5)$$

wobei G die Gewichtskraft des Körpers ist und aus den gemessenen Größen ΔE_{pot} und Δh abgeleitet werden kann [26].

Führt man außerdem einen der Versuche durch, in denen elektrische Energie über einen Motor in potentielle oder potentielle Energie über einen Generator in elektrische verwandelt wird, so lässt sich mit diesem Ergebnis der Wirkungsgrad 77 ermitteln. Damit hat man bereits eine vollständige Umwandlungssequenz realisiert,

$$\Delta E_{\text{el}} \rightarrow \Delta E_{\text{th}} \leftarrow \Delta E_{\text{pot}} \quad (6)$$

die über die Möglichkeit der Konsistenzprüfung einer Energieart (Kap. 4.2.1.) hinaus geeignet ist, die Konsistenz der Energiedefinition auch allgemein für mehrere Energiearten unter Beweis zu stellen (Diese Konsistenzprüfung vermag das gewünschte Ergebnis erst über komplexe Operationen hervorzubringen). Wie schon für die anderen eingeführten Energiearten vorgeschlagen, würde sich an dieser Stelle anbieten, das Konzept der potentiellen Energie durch Anwendungen zu vertiefen (z.B. Doppelpendelversuch).

4.3. Weitere Umwandlungen

Bei der Einführung weiterer Energiearten treten keine grundsätzlichen neuen Aspekte auf. Insbesondere lässt sich die kinetische Energie nach dem üblichen Schema mit Hilfe der potentiellen Energie einführen. Hier hätte man eine weitere Möglichkeit der Konsistenzprüfung. Mit Hilfe (z.B.) von Pendelversuchen lässt sich der Übergang von potentieller in potentielle Energie demonstrieren und somit der Nachweis führen, daß die Gleichung (5) eine Erhaltungsgröße E_{pot} definiert. Allerdings ist diese Konsistenzprüfung ähnlich wie diejenige der thermischen Energie auf *einen* Bereich beschränkt. Die Verknüpfung verschiedener Bereiche unter der Nebenbedingung der Erhaltung ist nur durch Umwandlungssequenzen von Typ (6) zu erreichen.

Im Sinne der Universalität des Energiekonzeptes ist eventuell auch an unübliche Energieumwandlungen, wie elektrische Energie \rightarrow chemische Energie und umgekehrt etwa mit der Daniell-Zelle oder chemische Energie \rightarrow potentielle Energie über die Osmose zu denken. Auf jeden Fall sollten einige Umwandlungsserien demonstriert werden, gegebenenfalls auch im Hinblick auf die dabei auftretenden Umwandlungsverluste. Daraus ließen sich Voraussetzungen für eine sachlich begründete Einschätzung der für die Energieversorgung typischen Energieumwandlungen schaffen.

5. Schluß

Wir haben versucht, die Sachstruktur eines Unterrichtsganges zu skizzieren, in der der lebensweltliche Energiebegriff zum Ausgangspunkt gewählt und im folgenden mit Hilfe der Erhaltungsvorstellung zu einem quantitativen Konzept präzisiert wurde [27]. Die Motivation zu diesem Vorgehen bezogen wir aus der Oberzeugung, daß

- die Energie fachwissenschaftlich zentral ist und eine wesentliche Grundlage der wissenschaftlich technischen Umwelt darstellt,
- der Energiebegriff anschaulicher und einfacher als der Kraft- und Arbeitsbegriff ist [11],
- unmittelbar von der Lebenswelt der Schüler ausgegangen werden kann.

Ein entscheidender Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren nach dem Schema Kraft - Arbeit - Energie, wie es in jüngster Zeit vom IPN erneut propagiert wird [28], besteht darin, daß

- der phänomenologische Energiebegriff direkt, d.h. ohne Rückgriff auf Kraft und Arbeit quantisiert,
- durch Messungen bereits recht früh ein Gefühl für Größenordnungen entwickelt und
- bei der Entwicklung sowohl der phänomenologischen Basis als auch von Meßverfahren von Anfang an die Universalität' des Energiekonzepts als konstitutives Merkmal benutzt werden kann.

Es ist geplant, den Unterrichtsvorschlag in der Schule zu erproben.

Anmerkungen und Literatur

[1] Im heute noch gültigen Verständnis wurde 'Energie' von W.J.M. Rankine im Jahre 1850 vorgeschlagen. In Deutschland setzte sich dieser Vorschlag nur allmählich durch, so daß noch zu Beginn unseres Jahrhunderts häufig von 'lebendiger Kraft' oder 'Arbeit' in der Bedeutung von Energie die Rede war. Selbst heute ist noch vom 'Kraftwerk' die Rede.

[2] Für die Orientierungsstufe ist der Vorschlag, Energie als Grundgröße einzuführen, von 0. Rang unterbreitet worden; allerdings fehlen konkrete Ausführungen. Vgl. 0. Rang, Zum Energiebegriff in der Orientierungsstufe. Der Physikunterricht 9/1, 13 (1975).

Kürzlich wurde in einer Arbeit von W. Jung et al . ein Unterrichtsversuch zur Energieeinführung mit Hilfe eines Schwungrades beschrieben. Vgl. W. Jung, E. Weber, H. Wiesner, Der Energiebegriff als Erhaltungsgröße, phys. did. 4, 1 (1977). Das IPN betont im qualitativen Teil der Energieeinführung den Begriff der Arbeit, die Quantifizierung erfolgt jedoch nach wie vor über den Kraftbegriff. Vgl. IPN-Curriculum 5-6, OS 2 'Arbeit und Energie' und IPN-Curriculum 7-8, 7.3. 'Energie-Arbeit-Leistung-Kraft', Stuttgart: Klett, 1978.

[3] F. Hund, Die Entwicklung und Bedeutung des Energiebegriffs. in: Das Naturbild der Physik, Jülich, 1975, S . 97.

[4] Die Differenzierung der Energiearten nach Speicher- und Transportform wird nicht nur phänomenologisch nahegelegt. Sie spielt eine wesentliche Rolle in der Thermodynamik. Speicherformen sind Zustandsfunktionen, während Transportformen vom Prozeß abhängen. Schwierigkeiten treten vorwiegend bei dem vorwissenschaftlichen Wärmebegriff auf, der nicht zwischen Transport- und Speicheraspekt differenziert.

Im folgenden soll von Wärme und Wärmeenergie nur dann die Rede sein, wenn es um die Transportform, also um die Methode der Energieübertragung geht. Wenn die in einem System gespeicherte innere Energie gemeint ist, deren Änderungen durch Temperaturmessungen bestimmt werden, sprechen wir von thermischer Energie. Erwärmung eines Systems bedeutet daher Erhöhung der thermischen Energie des Systems. Sie muß nicht notwendig die Konsequenz einer Energieübertragung in Form von Wärme sein. Uns ist dabei die Problematik bewußt, daß es i.a. unmöglich ist, Energie genau auf einen Freiheitsgrad der inneren Energie zu übertragen. Vgl. P. Farwig, H.J. Schlichting, U. Backhaus, Was ist empirisch am Energiesatz? physica didact (zur Veröffentlichung).

Zum Thema Wärmeenergie gibt es inzwischen eine umfangreiche Literatur: Hier seien nur einige auch didaktisch wertvolle Beiträge genannt:

O. Rang, Versuch einer didaktischen Analyse zur Unterrichtseinheit "Wärmeenergie", Der Physikunterricht 411, 27. (1970).

W. Jung, Was ist Wärmeenergie? Physik und Didaktik 1, 14 (1976).

G. Faik, W. Ruppel, Energie und Entropie, Berlin etc.: Springer, 1976.

[5] Obwohl z.B. der SCIS-Ansatz den Energiespeichern bzw. -quellen (energy sources) eine wichtige Rolle beimitzt, wird ihnen die Energieübertragung (energy transfer) vorausgestellt. Vgl. SCIS, Energy Sources, Chicago : Rand Mc Nally & Co, 1971.

- [6] Von Energieart ist die Rede, wenn die Unterscheidung von Speicher- und Transportform unerheblich ist.
- [7] Hier ist die Speicherart elektrische Energie' (z.B. im geladenen Kondensator) gemeint. Für die Transportart wird üblicherweise der gleiche Ausdruck verwendet.
- [8] U. Backhaus, P. Farwig, H. J. Schlichting, Zum Problem der Einführung der Entropie, in A. Scharmann (Hrsg.), Vorträge der Frühjahrstagung 1978, Gießen: DPG-FA Didaktik der Physik, 1978.
- [9] G. Ludwig, Einführung in die Grundlagen der Theoretischen Physik Bd. 1, Düsseldorf: Bertelsmann, 1974, S.38.
- [10] Diese Bedingung wird i.a. durch mehrere Definitionen erfüllt. Daher werden einschränkende Kriterien für die Definition benötigt. Solche Kriterien ergeben sich u.a. durch außerphysikalische, von der Scientific community hochgehaltene Werte. Die Einfachheit nimmt dabei eine ebenso wichtige wie unbestimmte Rolle ein.
- Vgl. T.S. Kuhn, Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Frankfurt: Suhrkamp 1976, S.196.
- Im Unterricht hat man sich entweder auf wissenschaftstheoretische Erörterungen einzulassen oder aber entsprechend weitgehende Vorgaben zu machen, um zum gewünschten Ziel zu kommen.
- [11] U. Backhaus, H. J. Schlichting, Vom didaktischen Wert physikalischer Grundbegriffe, Physik und Didaktik 7/3, 218 (1979).
- Vgl. auch: U. Backhaus, H. J. Schlichting, Didaktische Überlegungen zur Einführung von Kraft und Masse, Der Physikunterricht 13/1, 7 (1979).
- [12] H. Rumpf, Divergierende Unterrichtsmuster in der Curriculumentwicklung, Z. f. Päd. 1913, 405(1973).
- [13] Dieses Problem hat Erkenntnistheoretiker immer wieder beschäftigt. Siehe z.B.: H. Driesch, Philosophie des Organischen Bd. 11, Leipzig: Engelmann, 1909, S. 165 f. Der fachwissenschaftliche Hinweis, die Energie sei im System ‚Körper und Gravitationsfeld‘ gespeichert, macht die Angelegenheit für den Schüler nicht einleuchtender.
- [14] Erkenntnistheoretisch gesehen könnte dies allerdings gerade interessant sein, weil man hier ein einfaches Beispiel hat, bei dem man mit der Annahme der Proportionalität nicht ohne weiteres zum Ziel gelangt.
- [15] Dieses Problem wird in den meisten Abhandlungen über Energieumwandlungen ignoriert.
- [16] Thermische Energie als Ausgangspunkt zu wählen, ist insofern problematisch, als eine Umwandlung von thermischer Energie in eine andere Energieart schwierig erscheint. Zyklische Prozesse (z.B. Wärmekraftmaschine) implizieren sogar einen prinzipiell von eins verschiedenen Wirkungsgrad und erscheinen wegen der damit verbundenen Erörterung des Entropieprinzips verfrüht.
- [17] Im ‚Labor mit Schulversuchen‘ der Universität Osnabrück nimmt der Wechselstromzähler nach einem Vorschlag W. Kunzes bereits seit längerem eine wichtige Stellung bei der Behandlung der elektrischen Arbeit, Spannung etc. ein.
- [18] Nach dem ‚Gesetz über Einheiten im Meßwesen‘ wird die vorwissenschaftlich vertraute und betragsmäßig ziemlich handliche Kilowattstunde‘ zukünftig ausgeschlossen und durch die für vertraute Vorgänge viel zu kleine Einheit ‚Joule‘ ersetzt. Man sollte u.E. daher das ‚Megajoule‘ popularisieren (3,6 MJ ~ 1 kWh).
- [19] Einfache Vorschläge dazu findet man etwa bei: K. Matthew, Energy and fuel, School Science Review 197, 790 (1975).
- O.R. Sokoloff, Energy experiments for nonscience majors, The physics teacher 16, 86 (1978).
- [20] Gegebenenfalls bietet es sich an dieser Stelle an, die Spannung als Leistung/Stromstärke einzuführen, wenn vorher die Stromstärke als Grundgröße eingeführt worden ist. Ein entsprechender Vorschlag wird in H. J. Schlichting, U. Backhaus, in: Physikunterricht 5- 10, München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg 1981, S. 150ff.

Nachdem die Leistung eingeführt ist, besteht die Möglichkeit, die elektrische Energie fortan mit dem meßtechnisch sehr vielseitigen "Wattmeter" und einer Stoppuhr zu messen.

[21] Im Falle, daß man nicht von der allgemeinen (Kap. 3.), sondern von der speziellen Energieeinführung (Kap. 4.) ausgegangen ist, bietet es sich an, die Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Masse festzustellen, im anderen Falle ist die Proportionalität zwischen Wärmekapazität und Masse eine logische Folge der Definition. Die daraus hervorgehende Spezifische Wärmekapazität' verschiedener Substanzen könnte anschließend bestimmt werden.

[22] Vgl. Anmerkung 13.

[23] Bei den uns zur Verfügung stehenden Elektromotoren wurden Wirkungsgrade von höchstens 30 % gemessen.

[24] Die Gewichtskraft ist im Rahmen des vorliegenden Vorschlags zur Einführung der Energie noch nicht unbedingt bekannt.

[25] Kürzlich ist ein praktikabler Versuch, mechanische Energie in thermische umzuwandeln, beschrieben worden: F. Langensiepen, Experimente zur Wärme- und Elektrizitätslehre nach Abschaffung der Kalorie, Praxis der Naturwissenschaften/Physik 26, 97 (1977).

[26] An dieser Stelle würde es sich anbieten, die Masse abzuleiten. Siehe z.B.: U. Backhaus, H. J. Schlichting Probleme der Größeneinführung am Beispiel der Masse. In : Scharmann (Hrsg.), Vorträge der Frühjahrstagung der DPG 1982, Gießen 1982.

[27] Nach Fertigstellung dieser Arbeit erschien ein sehr lesenswerter Artikel von W. Jung, E. Weber, H. Wiesner, der einige der hier dargelegten Gedanken in ähnlicher Form enthält. Der resultierende Vorschlag für eine Unterrichtseinheit unterscheidet sich jedoch stark von dem vorliegenden. Vgl. W. Jung, E. Weber, H. Wiesner, Ein Versuch zur Einführung des Energiebegriffs, Der Physikunterricht 12/2, 22 (1978).

[28] R. Duit, Der Energiebegriff in IPN Curriculum Physik 5 bis 10 a.a.O.