

# **Mengenartige Größen im Physikunterricht**

F. Herrmann

Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

## *Zusammenfassung*

Es wird ein neues Konzept für den Physikunterricht an Schule und Hochschule vorgestellt. Im Mittelpunkt stehen die “mengenartigen” Größen Energie, Impuls, Entropie, elektrische Ladung und Stoffmenge. Durch das Ausnutzen von Analogien zwischen verschiedenen Teilgebieten der Physik bekommt der Kurs eine einheitliche Struktur und wird straffer als herkömmliche Kurse.

## 1. Einleitung

Das Lehrgebäude der Physik ist das Ergebnis eines Evolutionsprozesses, und wie jedes Produkt einer Evolution enthält es Spuren seiner Geschichte. Nun ging die Physik während ihrer Entwicklung oft verschlungene Wege. Manche dieser Umwege sind erhalten geblieben und müssen auch jetzt noch von jedem, der die Physik lernt, nachgegangen werden [1]. Es war unser Ziel, solche Umwege zu identifizieren und abzukürzen.

Das Ergebnis unserer Arbeit ist ein neuartiger Kurs, der inzwischen in mehreren Varianten existiert [2, 3, 4, 5]. Das auffälligste Charakteristikum des Kurses besteht darin, dass eine bestimmte Klasse von physikalischen Größen eine zentrale Rolle spielt: die extensiven oder *mengenartigen* Größen [6, 7, 8].

## 2. Physikalische Grundlagen

### 2.1 Mengenartige Größen

Als extensive oder mengenartige Größen bezeichnet man diejenigen Größen, deren Werte sich auf einen Raumbereich beziehen. Zu ihnen gehören Energie, elektrische Ladung, Stoffmenge, Impuls, Drehimpuls, Entropie und andere.

Für jede mengenartige Größe  $X$  gilt eine Gleichung des Typs:

$$dX/dt = I_X + \Sigma_X \quad (1)$$

Die Gleichung macht eine Aussage über ein bestimmtes Raumgebiet.  $dX/dt$  stellt die zeitliche Änderung des Wertes von  $X$  im *Innern* des Raumgebiets dar. Auch  $\Sigma_X$  bezieht sich auf das Innere des Gebiets. Der Wert von  $I_X$  dagegen bezieht sich auf seine *Oberfläche*.

Man kann Gleichung (1) und den in ihr auftretenden Größen eine anschauliche Deutung geben: Man stellt sich die Größe  $X$  vor als Maß für die Menge eines Stoffs oder Fluidums. Mit "vorstellen" ist gemeint, daß man physikalisch korrekt mit der Größe umgeht, wenn man so über sie spricht, wie man über einen Stoff spricht. Man darf dasselbe Vokabular verwenden, das in der Umgangssprache benutzt wird, um Substanzen zu bilanzieren.  $dX/dt$  ist demnach die zeitliche Änderung der Menge  $X$ .  $\Sigma_X$  gibt an, wieviel der Menge  $X$  im Raumbereich pro Zeiteinheit erzeugt oder vernichtet wird, und  $I_X$  deutet man als die Stärke eines Stroms, der durch die Oberfläche des Bereichs fließt [9]. Die Änderung des Wertes von  $X$  hat gemäß dieser Interpretation zwei Ursachen: Zum einen die Erzeugung bzw. Vernichtung von  $X$  im Innern des Gebiets und zum anderen einen Strom durch die Oberfläche. Gleichung (1) beschreibt demnach die Bilanz der Größe  $X$ .

Der Term  $\Sigma_X$  ist für manche mengenartigen Größen immer gleich null. Solche Größen können ihren Wert innerhalb eines Raumgebiets nur dadurch ändern, daß ein Strom durch die Oberfläche des Gebiets fließt. Man nennt sie Erhaltungsgrößen. Beispiele hierfür sind die elektrische Ladung und die Energie. So lautet Gleichung (1) für die elektrische Ladung

$$dQ/dt = I.$$

Hier ist  $I$  die elektrische Stromstärke.

Für die Energie gilt entsprechend

$$dE/dt = P,$$

wo  $P$  die Energiestromstärke oder "Leistung" ist.

Eine mengenartige Größe muß nicht unbedingt eine Erhaltungsgröße sein. Der Begriff der mengenartigen Größe ist umfassender als der Begriff der Erhaltungsgröße. Die Frage nach Erhaltung oder Nichterhaltung hat aber nur bei mengenartigen Größen einen Sinn.

Eine mengenartige Größe muß auch nicht unbedingt Skalar sein. Impuls und Drehimpuls sind Beispiele für vektorielle mengenartige Größen. Bei festgehaltenem Koordinatensystem darf man sich eine vektorielle mengenartige Größe als ein Ensemble von drei skalaren Größen vorstellen, wobei für jede der drei Vektorkomponenten einzeln eine Bilanzgleichung (1) gilt.

## 2.2 Vorteile der Verwendung mengenartiger Größen für den Unterricht

### 2.2.1 Der sprachliche Umgang mit physikalischen Größen

Die Tatsache, daß man über bestimmte Größen genauso sprechen darf wie über Stoffe, also z. B. wie über Wasser oder über Luft, ist für die Lehre der Physik sehr nützlich.

Gewöhnlich muß man sich, wenn man eine neue physikalische Größe kennenlernt, auch das verbale Umfeld dieser Größe aneignen: bestimmte Verben, Adjektive, Adverbien und Präpositionen. Bei der Formulierung von Sätzen, in denen z. B. die Größen Kraft, Arbeit oder Spannung vorkommen, hat man nicht viel Spielraum: Eine Kraft wird auf einen Körper "ausgeübt", oder sie "wirkt" auf den Körper, Arbeit wird "verrichtet" und eine elektrische Spannung "herrscht" oder "liegt an".

Beim Umgang mit mengenartigen Größen kann man sich dagegen aller umgangssprachlichen Wendungen bedienen, die man auch benutzt, um Stoffbilanzen zu formulieren. So kann man sagen: "Ein Körper enthält eine bestimmte Menge Impuls", – genauso aber auch: "In dem Körper steckt Impuls", "der Körper hat Impuls" oder "es ist soundsoviel Impuls in dem Körper drin". Auch darf man die Adverbien "viel" und "wenig" benutzen: Ein System kann viel oder wenig Energie haben (aber nicht viel oder wenig Temperatur). Man kann auch sagen, ein System habe "keine" Ladung oder "keinen" Impuls, um auszudrücken, daß der Wert von Ladung bzw. Impuls gleich null ist. Man kann dagegen nicht sagen, in einem Punkt sei kein Druck oder keine elektrische Feldstärke. Auch das "Fließen eines Stroms" einer mengenartigen Größe läßt sich auf die verschiedensten Arten zum Ausdruck bringen. So kann man sagen, die elektrische Ladung "fließt" oder "strömt" von *A* nach *B*. Man kann aber auch sagen, sie "geht" von *A* nach *B* oder sie "verläßt" *A* und "kommt in *B* an". Man kann Energie, Impuls oder Entropie "anhäufen", "konzentrieren", "verdünnen", "verteilen", "verlieren", "aufsammeln" und vieles andere mehr. Die Sprache, die hier verwendet wird, ist jedem Menschen vertraut, auch wenn er nie Physikunterricht gehabt hat. Die Hervorhebung des Mengencharakters dieser Größen ist daher für die Lehre an Schule und Hochschule sehr hilfreich.

In traditionellen Physikkursen werden diese Vorteile nicht immer genutzt. Nur die Größen Masse und elektrische Ladung werden so eingeführt, daß eine Anschauung vom Mengencharakter entsteht. Energie, Impuls und Entropie dagegen werden gewöhnlich aus anderen Größen abgeleitet. Dadurch wird die Einsicht, daß es sich um mengenartige Größen handelt, erschwert.

### 2.2.2 Strukturen in der Physik

Jeder Energietransport läßt sich durch eine Gleichung der Form

$$P = y I_X \quad (2)$$

beschreiben. Hier ist *P* die Energiestromstärke, *I<sub>X</sub>* die Stärke des Stroms der mengenartigen Größe *X* und *y* die zu *X* energiekonjugierte intensive Größe. Realisierungen von Gleichung (2) sind

$$P = \mathbf{v} \mathbf{F} \quad (3a)$$

$$P = U I \quad (3b)$$

$$P = T I_S \quad (3c)$$

$$P = \mu I_n \quad (3d)$$

( $\mathbf{v}$  = Geschwindigkeit,  $\mathbf{F}$  = Impulsstromstärke oder Kraft,  $U$  = elektrische Spannung,  $I$  = elektrische Stromstärke,  $T$  = absolute Temperatur,  $I_S$  = Entropiestromstärke,  $\mu$  = chemisches Potential,  $I_n$  = Stoffstromstärke).

Man sagt gewöhnlich, die Energie werde in einer bestimmten Form transportiert, je nach dem, welche der Gleichungen (3a) bis (3d) den Transport beschreibt [10]. Zu Gleichung (3a) gehört die Energieform Arbeit, zu (3b) gehört elektrische Energie, zu (3c) die Wärme und zu (3d) chemische Energie.

Die Gleichungen (3) legen ein einfaches Bild für die Beschreibung eines Energietransports nahe: Wir nennen, besonders in unseren Schulkursen, die einen Energiestrom begleitende mengenartige Größe den *Energieträger* [11]. Die Energie wird also, bildlich gesprochen, getragen von Impuls, elektrischer Ladung, Entropie, Stoffmenge etc. In Geräten, die nach traditioneller Sprechweise Energiewandler heißen, wechselt die Energie einfach den Träger. Sie gelangt mit einem Träger in das Gerät hinein, wird dort auf einen anderen Träger umgeladen und verläßt das Gerät mit diesem anderen Träger.

Die in Tabelle 1 erkennbare Entsprechung zwischen verschiedenen mengenartigen Größen, den zugeordneten Strömen und den energiekonjugierten intensiven Größen bildet die Grundlage einer Analogie zwischen Teilbereichen der Physik, die viel weiter geht, als es zunächst den Anschein hat. Sie gestattet eine Abbildung von physikalischen Größen, Relationen, Vorgängen, Erscheinungen und Geräten aufeinander. Diese Abbildung, die sich zunächst nur auf eine mathematische Strukturverwandtschaft bezieht, legt es nahe, in den verschiedenen Bereichen der Physik mit denselben Anschauungen zu operieren. Wir machen von dieser Möglichkeit ausgiebig Gebrauch. Die Straffung des Schulunterrichts, die wir mit unserem Konzept erreichen, beruht vor allem auf der Ausnutzung dieser Analogie.

In jedem der in Tabelle 1 aufgeführten Gebiete der Physik spielen zwei mengenartige Größen eine wichtige Rolle: zum einen die Energie und zum anderen die für das jeweilige Gebiet charakteristische, in Spalte 2 der Tabelle aufgeführte Größe. So sind die beiden mengenartigen Größen der Mechanik Energie und Impuls, die der Elektrizitätslehre Energie und elektrische Ladung. In der Wärmelehre sind es Energie und Entropie und in der Chemie Energie und Stoffmenge. Die Darstellung eines solchen Teilgebiets würde problematisch, wenn man versuchte, mit einer einzigen mengenartigen Größe auszukommen. In der historischen Entwicklung der Physik hat es lange gedauert, bis sich diese Einsicht durchsetzen konnte. So ging es in dem berühmten Streit zwischen Cartesianern und Leibnizianern über das "wahre Kraftmaß" in der Mechanik in moderner Sprache ausgedrückt um die Frage, ob der Impuls oder die kinetische Energie die "richtige" Größe sei. Man erwartete offenbar, daß für die Beschreibung von Bewegungsvorgängen ein einziges Mengen-

Tabelle 1. Zuordnung physikalischer Größen zu Teilgebieten der Physik und zur Chemie

	extensive Größe	Stromstärke	intensive Größe
Mechanik	Impuls $p$	Kraft $\mathbf{F}$	Geschwindigkeit $\mathbf{v}$
Elektrizitätslehre	elektrische Ladung $Q$	elektrische Stromstärke $I$	elektrisches Potential $\varphi$
Wärmelehre	Entropie $S$	Entropiestromstärke $I_S$	Temperatur $T$
Chemie	Stoffmenge $n$	Stoffstromstärke $I_n$	chemisches Potential $\mu$

maß zuständig sein sollte. Obwohl die beiden mengenartigen Größen der Thermodynamik, nämlich Energie und Entropie, seit mehr als 100 Jahren bekannt sind, bemüht man sich noch heute in der Lehre, einen möglichst großen Teil der Thermodynamik ohne Zuhilfenahme der Entropie darzustellen. Diesem Umstand verdankt die Schulwärmelehre ihren schwerfälligen Aufbau. Tabelle 1 läßt erkennen, daß eine Darstellung der Wärmelehre ohne Entropie einer Elektrizitätslehre entsprechen würde, die ohne elektrische Ladung und ohne elektrische Stromstärke operiert [12], oder einer Mechanik, in der es keinen Impuls und keine Kraft gibt.

Die bisherigen Betrachtungen zeigen, daß die Energie in der Physik eine übergeordnete Rolle spielt. Die Energie ist in Mechanik, Wärmelehre und Elektrizitätslehre gleichermaßen wichtig. Nun gibt es neben der Energie noch eine andere Größe, die eine solche gebietsübergreifende Funktion erfüllt: die Shannonsche Information oder "Datenmenge" – die Größe, deren Maßeinheit das bit ist. Genauso wie man Energietransporte klassifizieren kann nach dem "Energieträger", so kann man Datentransporte nach dem zugehörigen "Datenträger" einteilen. Und genauso wie jeder Energieträger ein bestimmtes Teilgebiet der Physik charakterisiert, so gehört auch jeder Datenträger zu einem bestimmten physikalischen Teilgebiet. So werden Datentransporte mit dem Datenträger "Licht" in der Optik behandelt. Der Datenträger "Schall" gehört in die Akustik und in der Elektronik hat man es mit der Elektrizität als Datenträger zu tun. Auch die Analogie zwischen Energie und Datenmenge hat eine gesunde physikalische Grundlage [13, 14].

### 2.3 Die Konzepte Strom, Antrieb, Widerstand

Wir diskutieren im Folgenden ein Bild, das man sich von den intensiven Größen machen kann. Das Bild selbst ist sehr bekannt und verbreitet, allerdings macht man von ihm gewöhnlich nur in der Elektrizitätslehre Gebrauch. Seine Stärke liegt aber gerade darin, daß es mit genauso viel Nutzen in Mechanik, Wärmelehre und Chemie angewendet werden kann. Seine Verwendung ist übrigens auch gang und gäbe in der Thermodynamik der irreversiblen Prozesse. Wir stellen es vor am vertrauten Beispiel der Elektrizitätslehre.

Ein elektrischer Strom fließe durch einen Widerstand, der nicht unbedingt ein ohmscher Widerstand zu sein braucht. Bereits die Wörter, die wir zur Beschreibung dieser Situation benutzen, beruhen auf dem Bild, um das es hier geht: Wir sprechen von einem "Strom", wenn die Größe  $I$  einen von null verschiedenen Wert hat, und wir nennen ein Gebilde, in dem dabei Entropie erzeugt wird, einen "Widerstand". Die Tatsache, daß der Strom, der durch den Widerstand fließt, um so größer ist, je größer die Potentialdifferenz  $\Delta\varphi$  ist, interpretiert man so, daß man sagt, die Potentialdifferenz sei der "Antrieb" des Stroms. Der Strom fließt, in diesem Bild, nicht von allein, denn der Widerstand des Gegenstandes, durch den er hindurchfließt, behindert ihn.

Wie willkürlich dieses Bild ist, wollen wir am Spezialfall des ohmschen Widerstandes erläutern. Für ihn gilt

$$U = R \cdot I.$$

Die Gleichung besagt, daß  $U$  und  $I$  proportional zueinander sind: Je größer  $U$ , desto größer  $I$ , oder je größer  $I$ , desto größer  $U$ . Sie sagt aber nichts darüber aus, wer die Ursache von wem ist. Daß wir es gewöhnlich als natürlicher empfinden, die Spannung, und nicht die Stromstärke als Ursache zu bezeichnen, liegt daran, daß man meist die Spannung leichter vorgeben kann. In dem Fall, daß man die Stromstärke vorgibt, etwa mit Hilfe eines stromstabilisierten Netzgeräts, spricht man tatsächlich auch lieber von einem Spannungsabfall, der von einem Strom verursacht wird.

Trotz dieser Willkür ist nun dieses Bild von Antrieb, Strom und Widerstand von großem Nutzen für den Lernenden, denn er kann sich, wenn er Phänomene der Elektrizitätslehre verstehen will, oder wenn er elektrotechnische Probleme lösen will, an den Erscheinungen orientieren, von denen dieses Bild her stammt: an Strömungen von Wasser und Luft. Auch das Bild von Antrieb und Widerstand passt in die im vorigen Abschnitt angesprochene einheitliche Struktur der Physik und trägt damit zu einer Vereinfachung der Lehre der Physik bei.

### 3. Einige Konsequenzen für den Unterricht

Während im vorangehenden Abschnitt die allgemeinen Grundlagen unseres Konzepts skizziert wurden, werden im Folgenden einige Konsequenzen dieser Struktur für den Unterricht der verschiedenen Teilgebiete der Physik beschrieben.

#### 3.1 Impuls von Anfang an

In der Mechanik wird gleich zu Beginn der Impuls eingeführt. Selbstverständlich, – denn die Mechanik ist ja in unserem Aufbau derjenige Teil der Physik, bei dem es um den Impuls und dessen Ströme geht. Der Impuls wird eingeführt als ein Mengenmaß für Bewegung, wie etwa die *quantitas motus* bei Descartes. Die Kraft ist nichts anderes als die Stärke des Impulsstroms [15,16]. Dieses Vorgehen bringt die folgenden Vorteile mit sich:

- Entsprechend Tabelle 1 sind die der Mechanik zugrunde liegenden Denkstrukturen dieselben wie die von Elektrizitätslehre und Wärmelehre.
- Die traditionelle Newtonsche Einführung der Mechanik ist Fernwirkungsmechanik. Sie beruht also auf Vorstellungen, die von der Physik spätestens seit Faraday und Maxwell verworfen werden.
- Einige Probleme, mit denen sich Schüler und Studenten beim traditionellen Vorgehen herumplagen müssen, verschwinden einfach. So bekommen die Newtonschen Grundgesetze eine so einfache Gestalt, daß es fast überflüssig wird, sie als Lehrsätze zu formulieren:
  1. Ein Körper ändert seinen Impuls nicht, wenn kein Impuls in ihn hinein oder aus ihm heraus fließt.
  2. Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers ist gleich der Stärke des Impulsstroms, der in ihn hineinfließt:  $dp/dt = F$ .
  3. Wenn Impuls von einem Körper A zu einem Körper B fließt, so ist die Stromstärke beim Verlassen von A gleich der beim Eintritt in B.

Der Inhalt dieser Sätze ist selbstverständlich, sobald man verstanden hat, daß der Impuls eine mengenartige Größe ist, die man nicht erzeugen und nicht vernichten kann. Man braucht diese Sätze ebensowenig zu formulieren, wie die entsprechenden Sätze für die elektrische Ladung. (“Wenn Ladung von einem Körper A in einem Körper B fließt, so ist die Stromstärke beim Verlassen von A gleich der beim Eintritt in B.”)

#### 3.2 Entropie von Anfang an

Wie in der Mechanik der Impuls, so ist in der Wärmelehre die Entropie der Protagonist, und wir führen sie ganz zu Anfang der Wärmelehre bzw. Thermodynamik ein. Sie wird vorgestellt als ein Mengenmaß für das, was man umgangssprachlich Wärme nennt [17, 18]. Eine Temperaturdifferenz erscheint als Antrieb für einen Entropiestrom. So kommt man schnell zu wichtigen Themen der Wärmelehre, etwa zur Behandlung von Wärmepumpe und Wärmekraftmaschine.

Große Vorteile bringt das Operieren mit der Entropie auch für die Thermodynamik der Gase, sowie bei der Behandlung von Phasenübergängen. Man muß Wasser, damit es verdampft, Entropie zuführen. Der Wasserdampf enthält so viel mehr Entropie als das flüssige Wasser, wie man beim Verdampfen zugeführt hat. Das Entsprechende kann man von der traditionellen Verdampfungswärme nicht sagen: Bekanntlich trifft es nicht zu, daß die Wärme, die man beim Verdampfen zuführt, nachher im Dampf enthalten ist.

### **3.3 Felder als physikalische Systeme**

Das Feld wird eingeführt als physikalisches System, das genauso real existiert wie andere Systeme auch, etwa wie ein starrer Körper oder wie ein Gas [19]. Üblicherweise wird das Feld eingeführt etwa als "ein Raumbereich in dem Kräfte wirken". Diese Einführung führt leicht zu Verständnisschwierigkeiten: Einen solchen Raumbereich stellt sich der Lernende als leer vor. Wenn der Raumbereich aber leer ist, wie kann er dann bestimmte Eigenschaften haben? Sicher kommt man so nicht auf die Idee, daß ein Feld durch dieselben physikalischen Größen beschrieben wird, wie ein Körper: durch Energie, Impuls, Entropie, Druck, Temperatur etc., kurz, daß ein Feld nicht geheimnisvoller ist als etwa Luft.

### **3.4 Das chemische Potential als Antrieb von Reaktionen**

Sowohl unser Mittelstufenkurs, als auch die Hochschulthermodynamik enthalten eine Unterrichtseinheit "Physikalische Chemie". Auch diese physikalische Chemie hat dieselbe Struktur wie Elektrizitätslehre und Wärmelehre [20, 21]. Wie eine elektrische Potentialdifferenz als Antrieb eines elektrischen Stroms auftritt oder eine Temperaturdifferenz einen Entropiestrom verursacht, so erscheint eine chemische Potentialdifferenz als Antrieb einer chemischen Reaktion. In Analogie zum elektrischen Widerstand wird der Reaktionswiderstand eingeführt. Ein Katalysator ist dann eine Art Schalter, mit dem eine Reaktion eingeschaltet werden kann. Brennstoffzelle und Elektrolysezelle werden vorgestellt als Geräte, die Energie vom Träger Stoffmenge auf den Träger Elektrizität bzw. umgekehrt umladen.

### **3.5 Daten und Datenträger**

Die Schulversion unseres Kurses enthält ein Kapitel "Daten und Datenträger". Ziel dieser Unterrichtseinheit ist es, die Gemeinsamkeiten von Optik, Akustik, Informatik und Elektronik klarzumachen. Es werden Geräte und Erscheinungen, die scheinbar nicht viel miteinander zu tun haben, unter gemeinsamen Gesichtspunkten behandelt. So lernen die Schüler, daß etwa Lautsprecher, Videokamera und Antenne Geräte sind, die Daten von einem auf einen anderen Träger umladen. Auch Schallplatte, Buch, Foto, Schlüssel, DNS, Gehirn etc. haben eine gemeinsame Funktion: Sie sind Datenspeicher. Wichtigstes Hilfsmittel bei der umfassenden Beschreibung von Vorgängen der Datenübertragung, -speicherung und -verarbeitung ist die Shannonsche Datenmenge. Auch im Hochschulkurs zur Thermodynamik wird die Shannonsche Datenmenge eingeführt, und es wird ihre Beziehung zur Entropie gezeigt [14].

### **Danksagung**

Einen großen Teil, der dem hier vorgestellten Kurs zugrunde liegenden Ideen verdanke ich meinem verehrten Lehrer Prof. Dr. Gottfried Falk und meinem Freund und Kollegen Dr. Georg Job.

## Literatur

- [1] HERRMANN, F., G. JOB: The historical burden on scientific knowledge. Eur. J. Phys. 17,159-163 (1996).
- [2] FALK,G., HERRMANN, F.: Neue Physik – Das Energiebuch. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1981).
- [3] HERRMANN, F.: Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I, Teile 1, 2 und 3 und Unterrichtshilfen. Zu beziehen bei Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe
- [4] HERRMANN, F.: Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II, Elektrodynamik, Schülertext und Unterrichtshilfen. Zu beziehen bei Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe
- [5] Der Karlsruher Physikkurs. CD-ROM für MacOS, MS-DOS, WINDOWS und WINDOWS 95. Die CD enthält außerdem Hochschulsripten zur Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und Optik, sowie eine Auswahl aus Veröffentlichungen in Fachzeitschriften. Zu beziehen bei Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe
- [6] FALK, G.: Theoretische Physik, Band II, S. 48. Springer Verlag, Berlin (1968).
- [7] FALK, G.: Was an der Physik geht jeden an? Phys. Blätter 33, 616-626 (1977).
- [8] FALK, G.: Physik: Zahl und Realität. Die begrifflichen und mathematischen Grundlagen einer universellen quantitativen Naturbeschreibung, S. 67f. Birkhäuser Verlag, Basel (1990).
- [9] HERRMANN, F.: Is an energy current energy in motion? Eur. J. Phys. 7,198-204 (1986).
- [10] FALK, G., RUPPEL, W.: Energie und Entropie. Springer Verlag, Berlin (1976).
- [11] FALK, G., HERRMANN, F., SCHMID, G. B.: Energy forms or energy carriers? Am. J. Phys. 51, 1074-1077 (1983).
- [12] FUCHS, H.: A surrealistic tale of electricity. Am. J. Phys. 54, 907-909 (1986).
- [13] HERRMANN, F., SCHMÄLZLE, P.: Daten und Energie. J. B. Metzler und B. G. Teubner, Stuttgart (1987).
- [14] HERRMANN, F., SCHMID, G. B.: An analogy between information and energy. Eur. J. Phys. 7, 174-176 (1986).
- [15] HERRMANN, F., SCHMID, G. B.: Analogy between mechanics and electricity. Eur. J. Phys. 6, 16-21 (1985).
- [16] HERRMANN, F., SCHMID, G. B.: Statics in the momentum current picture. Am. J. Phys. 52, 146-152 (1984).

- [17] JOB, G.: Neudarstellung der Wärmelehre. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main (1972).
- [18] FUCHS, H.: The dynamics of heat. Springer Verlag, New York (1996).
- [19] HERRMANN, F.: Energy density and stress: A new approach to teaching electromagnetism. Am. J. Phys. 57, 707-714 (1989).
- [20] JOB, G.: Das chemische Potential im Physik- und Chemie-Elementarunterricht. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 2, S.67-78. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1978).
- [21] JOB, G.: Chemische Reaktionen physikalisch beschrieben. S.14-31. Reaktionen in der Biologie. S. 84-94. Die Werte des chemischen Potentials. S. 95-110. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 4, Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1978).