

# Gutachten über den Karlsruher Physikkurs

*In Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*

## **Ansprechpartner:**

StD Rudolf Lehn, DPG-Vorstandsmitglied für das Ressort Schule (sfz@uni-ulm.de)

## **Gutachtergruppe:**

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Theoretische Astrophysik, Universität Heidelberg

OSTR Fabian Bühler, Störck-Gymnasium Bad Saulgau

Prof. em. Dr. Dr. h.c. mult. Siegfried Großmann, Theoretische Physik, Universität Marburg

StD Wolfhard Herzog, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung Heidelberg

Prof. em. Dr. Jörg Hüfner, Theoretische Physik, Universität Heidelberg

StD Rudolf Lehn, Störck-Gymnasium Bad Saulgau und Schülerforschungszentrum Südwürttemberg

StD i.R. Dr. Rudolf Löhken, Staatliches Seminar für Didaktik und Lehrerbildung Heidelberg

Prof. Dr. Karlheinz Meier, Experimentelle Physik, Universität Heidelberg

Prof. Dr. Dieter Meschede, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn

Prof. Dr. Peter Reineker, Wilhelm und Else Heraeus-Seniorprofessor für die Weiterentwicklung der Lehrerausbildung im Fach Physik, Universität Ulm

Prof. Dr. Metin Tolan, Experimentelle Physik, Prorektor für Studium an der Technischen Universität Dortmund

Prof. Dr. Jochen Wambach, Institut für Kernphysik, Universität Darmstadt

Prof. Dr. Werner Weber, Theoretische Physik, Technische Universität Dortmund

**Bad Honnef, 28. Februar 2013**

## *Zusammenfassung*

Physik ist eine der Grundlagenwissenschaften unserer Kultur und Zivilisation. Ihre wesentliche Aufgabe ist es, die Vielfalt der Erscheinungen in der materiellen Welt auf möglichst wenige fundamentale Gesetze zurückzuführen. Sie hat sich deswegen als erfolgreich erwiesen, weil ihrer Vorgehensweise drei wesentliche Prinzipien zugrunde liegen:

- Für den Aufbau der Physik wesentliche Begriffe werden durch präzise Definitionen oder Messvorschriften festgelegt.
- Modellvorstellungen verbinden die so geschaffenen Begriffe.
- Physikalische Aussagen, die Experimenten widersprechen, gelten als falsch.

Aufgrund dieser Prinzipien sind physikalische Aussagen objektivierbar. Da sich physikalische Aussagen durch Messung belegen lassen müssen, müssen sie auch quantifizierbar sein. Deshalb werden in der Physik mathematische Gleichungen aufgestellt, die ihre wesentlichen Größen zueinander in Beziehung setzen. Diese mathematische Formulierung ihrer wesentlichen Aussagen setzt eine präzise Verwendung klar definierter Begriffe voraus. Eine (internationale) Verständigung über Physik setzt ferner voraus, dass einheitliche Begriffssysteme verwendet werden.

Es ist die Überzeugung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), dass Physik auf allen Ebenen der Ausbildung so unterrichtet werden muss und kann, dass ihre wesentliche Eigenschaft unmissverständlich klar wird: Physik ist eine empirische Naturwissenschaft, die aufgrund ständiger, strenger Orientierung am Experiment zu objektivierbaren Aussagen gelangt. Die DPG unterstützt Überlegungen und Versuche, dies im Unterricht an den Schulen möglichst verständlich umzusetzen, sieht es aber auch als ihre Aufgabe an, misslungene Versuche zu kritisieren.

Der Karlsruher Physikkurs (KPK) wird den oben formulierten Zielen nicht gerecht. Er baut wesentlich auf willkürlich gewählten, nicht durch Messvorschriften belegbaren oder Messungen zum Teil widersprechenden Begriffen auf, die allein aufgrund didaktischer Überlegungen eingeführt werden und größtenteils dazu dienen, behauptete Analogien quer durch die gesamte dargestellte Physik durchhalten zu können. Dadurch erzeugt der KPK eine grundsätzlich falsche Vorstellung von Physik. Die Strenge des naturwissenschaftlichen Denkens und der empirischen Vorgehensweise werden durch den KPK verletzt.

Wir raten daher der Deutschen Physikalischen Gesellschaft mit Nachdruck, dass der Karlsruher Physikkurs weder für den Unterricht verwendet noch Lehr- oder Bildungspläne auf ihm aufgebaut oder nach ihm ausgerichtet werden sollen.

Diese Aussagen werden im Folgenden durch wenige, besonders aussagekräftige Beispiele belegt.

## Beispiel 1: Der Begriff des Impulsstroms in der Mechanik

In dem Bestreben, Strömungsvorgänge in möglichst allen Teilgebieten der Physik als grundlegend zu betrachten, führt der KPK in der Mechanik das Konzept des Impulsstroms anstelle der Kraft ein. Dahinter steht die Vorstellung, dass ein Impulsstrom eine anschaulichere Größe als die Kraft sei, weil er Vergleiche mit anderen Strömungsvorgängen nahelegt. Während nach dem Newtonschen Bewegungsgesetz die Kraft die Ursache für die Änderung des Impulses ist, ändert sich nach dem KPK der Impuls eines Körpers, weil ein Impulsstrom in den Körper hinein bzw. aus ihm heraus fließt. Nun könnte man vermuten, dass Impulsstrom einfach ein anderes Wort für Kraft ist. Das ist aber nicht so, denn die Verwendung von Impulsströmen anstelle von Kräften führt auf widersprüchliche und z.T. sogar falsche Aussagen. Dies wird im Folgenden begründet.

### Was ist mit dem Impulsstrom gemeint?

Die Vorstellung des KPK zum Impulsstrom soll anhand der Abb. 1 erläutert werden, die dem Schulbuch zum KPK [1] entnommen ist. Ein Wagen wird von einer Person mit Hilfe eines Seils gezogen und dabei beschleunigt. Es wird angenommen, dass die Fahrtrichtung entlang der  $x$ -Achse verläuft. Nach dem KPK wird der Wagen beschleunigt, weil Impuls über das Seil in den Wagen fließt, wobei die Fließrichtung wie folgt festgelegt wird: Ein positiver Impuls fließt in den Wagen,

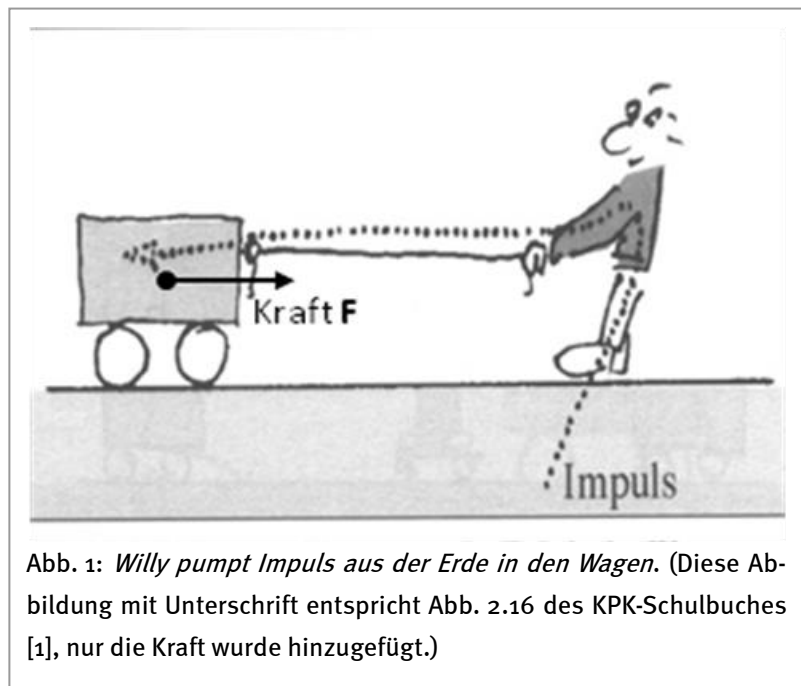


Abb. 1: Willy pumpt Impuls aus der Erde in den Wagen. (Diese Abbildung mit Unterschrift entspricht Abb. 2.16 des KPK-Schulbuches [1], nur die Kraft wurde hinzugefügt.)

wenn der Impuls des Wagens in Richtung der positiven  $x$ -Achse zunimmt. Die Richtung des so definierten Impulsstroms, den wir im Folgenden „KPK-Impulsstrom“ nennen, ist also mit der Richtung der  $x$ -Achse verknüpft, die in der Regel von links nach rechts orientiert wird.

Mit dem traditionellen Konzept der Kraft beschreibt man den Vorgang in Abb. 1 wie folgt: Der Wagen wird beschleunigt, weil über das Seil auf den Wagen eine Kraft ausgeübt wird. Diese zeigt in Richtung der Beschleunigung. Der Übersichtlichkeit halber lassen wir die Kraft immer im Schwerpunkt angreifen. Wenn Kraft bzw. KPK-Impulsstrom als Ursachen den Wagen in gleichem Maße beschleunigen, müssten eigentlich beide Größen in Betrag und Richtung gleich groß sein. Während dies bei den Beträgen zutrifft, kann es bei den Richtungen Unterschiede geben, wie im Folgenden gezeigt wird.

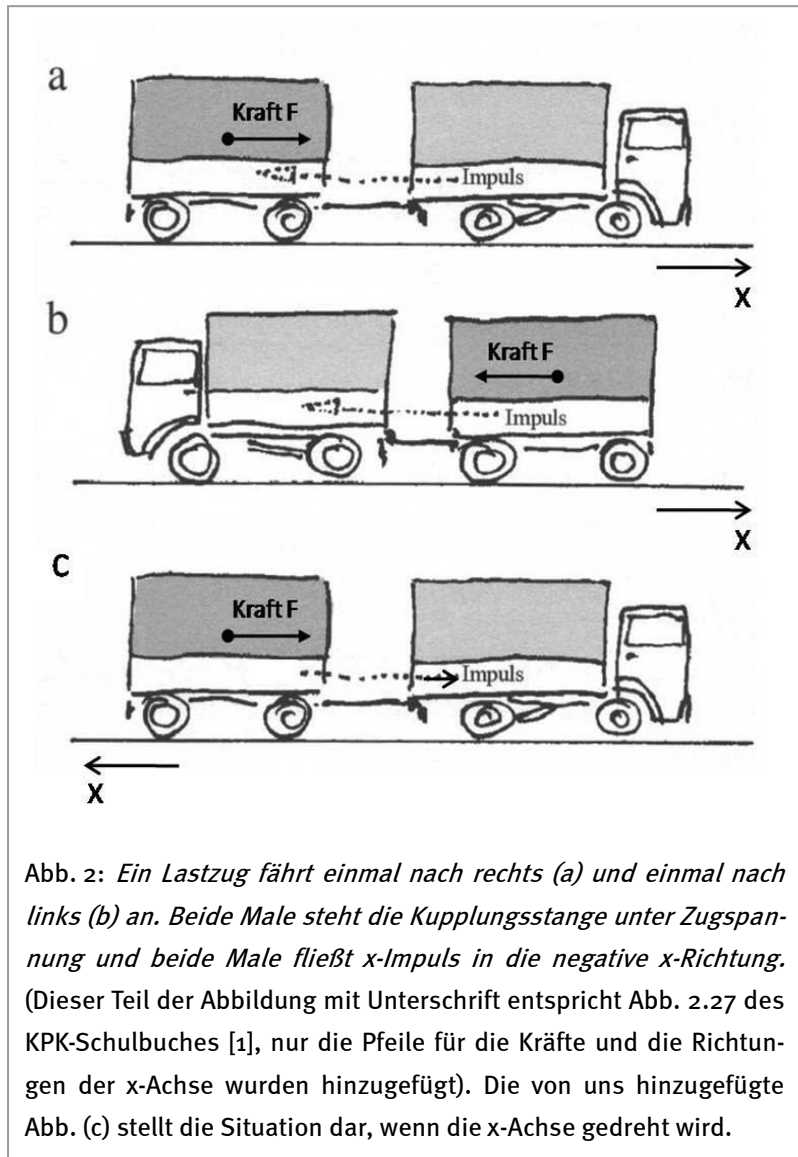
## Verhalten unter Drehungen

Wie sich die Richtungen des KPK-Impulsstroms und der Kraft unter Drehungen verhalten, soll anhand der Abbildungen 2a bis 2c erläutert werden. In Abb. 2a zieht ein Lastwagen einen Anhänger nach rechts (diese Situation ist mit der aus Abb. 1 vergleichbar). Der KPK-Impulsstrom zeigt nach links, während der Kraftpfeil nach rechts zeigt. In der nächsten Abb. 2b ist der Lastzug um  $180^\circ$  gedreht worden: Dem KPK [1] zufolge hat sich die Richtung des KPK-Impulsstroms beim Übergang von Abb. 2a nach 2b nicht verändert. Dagegen ist Richtung der Kraft der Drehung des Lastzugs um  $180^\circ$  gefolgt: In beiden Fällen, Abb. 2a und 2b, zeigt die Kraft in Richtung der Zugmaschine. Das ist auch vernünftig, weil sie die Ursache für die Beschleunigung des Anhängers ist.

Kann ein Schüler das unterschiedliche Verhalten von Kraft und Impulsstrom

bei einer  $180^\circ$ -Drehung verstehen? Man kann die in Abb. 2a und 2b gezeigten Situationen im Unterricht nachstellen, indem man Lastwagen und Anhänger durch zwei Schüler ersetzt, die durch ein Seil verbunden sind. Der gezogene Schüler wird sofort die Richtung der Kraft in den Situationen der Abb. 2a und 2b durch eigene Erfahrung bestätigen. Aber er kann durch seine Sinne nicht erfassen, dass der Impulsstrom seine Richtung nicht verändert hat, wenn der Lastzug in die andere Richtung fährt.

In Abb. 2c ist das Ergebnis einer anderen Drehung gezeigt. Hier wird nicht der Lastzug gedreht, sondern das Koordinatensystem. In der neuen Situation zeigt die positive x-Achse nach links. Damit hat sich auch die Richtung des KPK-Impulsstroms geändert, wie Abb. 2c zeigt. Denn bei der Beschleunigung des Anhängers nach rechts wird sein Impuls immer negativer. Also muss (positiver) Impuls aus ihm herausfließen.



Der Vergleich von Abb. 2a und 2c zeigt sehr anschaulich, dass die Richtung des KPK-Impulsstroms eng mit der Lage des Koordinatensystems verbunden ist. Das führt nun zu folgenden Problemen: Wenn man die Lage des Koordinatensystems nicht kennt, kann man auch nicht die Richtung des KPK-Impulsstroms festlegen. Solche Situationen können leicht auftreten, wenn z.B. der Lastzug durch einen Wald fährt, wo keine x-Achse auf dem Boden eingezeichnet ist. Eine weitere Schwierigkeit tritt auf, wenn sich z.B. zwei Schüler über die Ausrichtung ihrer Koordinatensysteme nicht einigen können. Dann werden sie verschiedene Antworten auf die Frage nach der Richtung des KPK-Impulsstroms geben. Und beide Antworten können gleichzeitig richtig sein! In Anbetracht solcher Probleme beginnt man zu sich zu fragen, ob der Richtung des KPK-Impulsstroms überhaupt eine objektive Realität zukommt und sie nicht nur eine willkürliche Festsetzung ist. Diese Überlegungen werden im nächsten Abschnitt noch vertieft.

### **Ist die Richtung des KPK-Impulsstroms messbar?**

Es ist das Großartige an der Physik, dass ihre Aussagen experimentell überprüft werden können. Daher ist es eine wichtige Frage, ob die Aussagen des KPK über die Richtung des Impulsstroms experimentell überprüfbar sind.

Wasser fließt von einem höher gelegenen Reservoir zu einem tiefer gelegenen. An jeder beliebigen Stelle lässt sich die Fließrichtung durch ein in den Strom gebrachtes Instrument eindeutig messen, z.B. durch ein Wasserrad oder einen in das Wasser geworfenen Korken. In welche Richtung fließt der vom KPK eingeführte Impulsstrom, und wie kann dessen Richtung gemessen werden? Diese Frage soll anhand eines Beispiels diskutiert werden, das aus dem Schulbuch des KPK (Abb. 2.30 aus [1]) stammt und in Abb. 3a gezeigt wird. Eine Feder ist in ein Joch eingespannt. Alle Teile des Systems sind in Ruhe. Dennoch behauptet der KPK, dass durch die Feder und das Joch ein Impulskreisstrom fließe, dessen jeweilige Richtungen durch die Pfeile angezeigt sind. Da an dem System keine Bewegung zu erkennen ist, müsste ein aufgeweckter Schüler eigentlich fragen, wie man denn nachweisen könne, dass wirklich etwas durch die Feder fließt. Eine etwas schwierigere Frage könnte lauten: Warum ist an einem offensichtlich symmetrischen System eine Richtung vor der anderen ausgezeichnet? Und wenn der Lehrer das schon behauptet, wie kann er uns das beweisen?

Aus der Elektrizitätslehre wissen die Schüler, dass man auch dort durch einfaches Betrachten eines Drahtes nicht feststellen kann, ob darin ein Strom fließt und, wenn ja, welche Richtung er hat. Aber sie wissen auch, dass es Geräte gibt, mit denen man die Stärke und die Richtung des elektrischen Stroms nachweisen kann. Zwei solcher Geräte sind in dem durch eine Batterie gespeisten Stromkreis in Abb. 3b eingezeichnet: eine Glühlampe und ein Amperemeter. Das Leuchten der Glühbirne zeigt an, dass ein Strom fließt. Ihre Helligkeit, die ein qualitatives Maß für die Stromstärke ist, hängt allerdings nicht von der Richtung des Stroms ab. Jedoch kann man mit einem Amperemeter beides, die Stärke und die Richtung des Stroms messen.

Gibt es nun ein dem Amperemeter vergleichbares Instrument für den KPK-Impulsstrom? Ein solches Instrument wird in dem Schulbuch für den KPK nicht beschrieben. Zwar gibt es die in der Mechanik wohlbekannteren Kraftmesser, wobei die Länge der gespannten Feder ein Maß für die Stärke der Kraft ist. Aber da zu jeder Kraft auch eine entgegengesetzte gleich starke Gegenkraft gehört (actio = reactio) und diese beiden vollständig symmetrisch sind, können Kraftmesser prinzipiell keine Richtung auszeichnen. Abbildung 3c zeigt, wie ein Kraftmesser in die Versuchsanordnung der Abb. 3a eingebaut werden könnte. Je nach der in der Feder herrschenden Spannung wird der Kraftmesser mehr oder weniger gedehnt, ohne dass eine Richtung bevorzugt ist. Der Kraftmesser ist deshalb mit der Glühlampe im elektrischen Fall vergleichbar, aber nicht mit dem Amperemeter.

Das fehlende Messinstrument für die Richtung des Impulsstroms ersetzt der KPK durch einen Satz von Regeln (S. 18 aus [1]) wie zum Beispiel: Wenn

eine Zugspannung herrscht, dann fließt  $x$ -Impuls in die negative  $x$ -Richtung. In einer solchen Festlegung liegt das Problem: Denn die Richtung der  $x$ -Achse kann willkürlich im Raum festgelegt und auch verändert werden, unabhängig vom physikalischen Geschehen innerhalb des Systems. Damit kann auch die Richtung des KPK-Impulsstroms willkürlich, d.h. unabhängig vom Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert werden. Wir schließen daraus: die Richtung des KPK-Impulsstroms ist keine Eigenschaft des Systems.

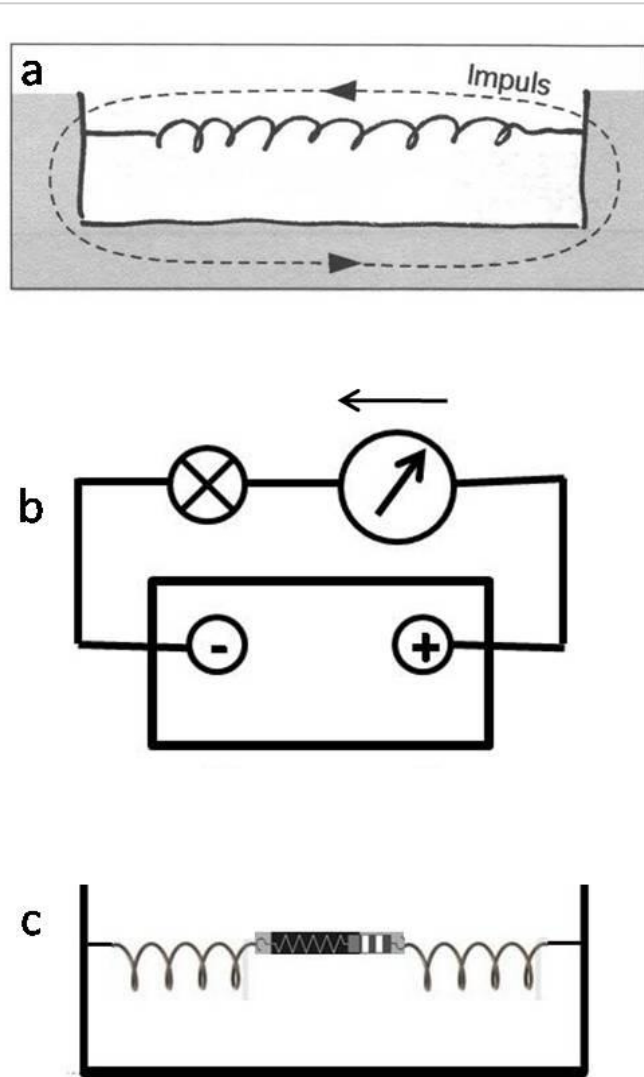


Abb. 3: Messung von KPK-Impulsströmen und elektrischen Strömen.

a. Die Abbildung entspricht der Abb. 2.30 aus [1] mit der Unterschrift: „Impulsstrom ohne Antrieb“.

b. Elektrischer Stromkreis mit Batterie, Glühlampe und Amperemeter.

c. Schematische Darstellung der Anordnung Abb. 3a mit eingefügtem Kraftmesser.

Zwar gibt es auch in der Elektrizitätslehre eine Konvention, die die Richtung des elektrischen Stroms festlegt, z.B. vom Plus- zum Minuspol. Aber hat man erst einmal alle Amperemeter nach dieser Konvention kalibriert, lassen sich für alle Zukunft die Stromrichtungen in allen Systemen ohne Willkür messen. Etwas Analoges gibt es für die Messung der Richtung des KPK-Impulsstroms nicht.

Fazit: Die eingangs gestellte Frage, ob die Aussagen des KPK über die Richtung des Impulsstroms experimentell überprüfbar sind, muss verneint werden. Deshalb ist die vom KPK eingeführte Richtung des Impulsstroms eine willkürlich festgelegte Konvention, der keine objektive Realität zukommt: Es gibt diesen Strom in der Natur nicht. Damit hat der KPK-Impulsstrom auch keinen Platz im Gebäude der Physik und ganz gewiss auch nicht im Physikunterricht.

### ***Beispiel 2. Entropie und Wärme in der Thermodynamik***

Der Karlsruher Physikkurs [5] verwendet einen alternativen Zugang zur Thermodynamik, der nicht auf den Begriffen Temperatur und Wärme, sondern auf den Begriffen Temperatur und Entropie aufbaut. Andere Zugänge zur Physik zu suchen, die Schülern das Verständnis erleichtern, ist legitim und wünschenswert, aber sie müssen auch überzeugen, und vor allem müssen sie wissenschaftlich korrekt sein.

Die Thermodynamik ist ein Bereich der makroskopischen Physik, der die physikalischen Revolutionen des 20. Jahrhunderts im Kern unberührt überstanden hat. Sie baut auf drei so genannten Hauptsätzen auf: Einer, nullter Hauptsatz genannt, führt den Temperaturbegriff ein. Der erste Hauptsatz ist der Satz von der Erhaltung der Energie, und der zweite Hauptsatz behandelt die Eigenschaften der Entropie.

Der Begriff der Temperatur ist Schülern einfach zu vermitteln. Zur alltäglichen Erfahrung kommt lediglich hinzu, dass es eine absolute Temperaturskala gibt. Auch bei den Begriffen Wärme und Energie bringen die Schüler ein gewisses Vorverständnis mit. Das gilt sicher nicht für die Entropie. Sie ist eine wichtige Größe für das Verständnis von Vorgängen in der Natur und Technik. Energie und Entropie müssen streng unterschieden werden. Beide Begriffe sind notwendig, um beispielsweise Umwandlungen von übertragener Energie, wie die von Wärme in Arbeit, zu verstehen. Und: Während Wärme bei Prozessen eine Rolle spielt und deswegen Prozessgröße genannt wird, sind die Innere Energie und die Entropie Zustandsgrößen. Jeder Körper „hat“ eine Innere Energie und eine Entropie, so wie er eine Masse, ein Volumen und eine Temperatur „hat“.

Bekanntermaßen ist Entropie eine der schwierigsten Größen der Physik. Deshalb ist man gespannt, wie der KPK sie einführt. Auf S. 5 steht dazu in [5] (wörtliche Zitate stehen in Anführungsstrichen):

„Auch die [neben der Temperatur] zweite Größe, die wir brauchen, müsstest du kennen, allerdings unter einem anderen Namen als dem in der Physik gebräuchlichen. Es handelt sich bei ihr um das, was man umgangssprachlich »Wärmemenge« nennt, oder auch einfach »Wärme«. Ihr physikalischer Name ist Entropie, ihr Symbol  $S$  und ihre Maßeinheit Carnot, abgekürzt Ct.“

Es ist zwar richtig, dass die Entropie eines Systems durch Zufuhr oder Abfuhr von Wärme verändert werden kann. Aber deshalb ist Entropie noch lange nicht der Wärme gleichzusetzen, auch keiner „umgangssprachlich“ so bezeichneten. Beide haben verschiedene Maßeinheiten, können also schon deshalb nicht gleich sein. Wärme misst man in Joule, Entropie in Joule/Kelvin. Der KPK stützt seine Argumentationen fast ausschließlich auf die Gleichung  $\Delta S = \Delta Q/T$ , die im eingeschränkten Fall einer reversiblen Wärmezufuhr oder -abfuhr  $\Delta Q$  bei einer Temperatur  $T$  die Entropieänderung  $\Delta S$  angibt. Dabei verschweigt der KPK die Einschränkungen dieser Gleichung:

1. Er wendet die Gleichung unverändert auch bei irreversiblen Prozessen an, obwohl dort  $\Delta S \geq \Delta Q/T$  gilt. Damit behindert er den Zugang zu den für das Verständnis unserer Welt so ungeheuer wichtigen irreversiblen Prozessen. Diese laufen gerade deswegen in eine Richtung und nicht umkehrbar ab, weil die Entropie spontan zunehmen, aber nicht spontan abnehmen kann! Dann gilt aber das Größer- und nicht das Gleichheitszeichen in der obigen Relation.

2. Es gibt wichtige Prozesse, in denen die obige Formel gar nicht anwendbar ist, weil sich die Entropie als Zustandsgröße ohne Wärmezufuhr verändert. Die Entropie kann sich auch verändern, weil andere Zustandsgrößen verändert werden, denn Zustandsgrößen sind durch Zustandsgleichungen miteinander verbunden. Ein Beispiel ist die Ausdehnung eines Gases um das Volumen  $\Delta V$ . Dabei nimmt die Entropie um  $\Delta S \geq \Delta V \cdot (p/T)$  zu, worin  $p$  der Druck ist. Solche einfachen Prozesse kann der KPK nicht verständlich erklären.

Die oben zitierte Definition der Entropie ist keineswegs ein Ausrutscher, sondern wird über viele Seiten benutzt, um Experimente und Alltagsphänomene zu erklären, wobei manches Fragwürdige herauskommt. Das soll an drei Beispielen erläutert werden.

### Temperaturlausgleich

In Abb. 1.5 ([5], S. 7, hier mit Unterschrift als Abb. 4 reproduziert) wird den Schülern das sehr wichtige Experiment gezeigt, bei dem zwei Körper, die zunächst verschiedene Temperaturen haben, in Wärmekontakt gebracht werden. Der wärmere Körper kühlt sich ab und der kältere erwärmt sich, bis beide dieselbe Temperatur angenommen haben. Was passiert bei diesem Versuch?

Die Schüler, die wissen, dass mit Wärmezufuhr eine Temperaturerhöhung verbunden ist (und eine Erniedrigung bei Abfuhr), würden vermutlich sagen, dass Wärme vom wärmeren zum kälteren Körper fließt. Damit haben sie auch Recht, zumindest nach allen Lehrbüchern außer dem KPK. Die Erklärung des KPK für diesen Versuch ist in der Unterschrift zu Abb. 1.5 enthalten, die in unserer Abb. 4 reproduziert wird: Was vom heißeren zum kälteren Körper fließt, sei Entropie. Es ist zwar richtig, dass neben der Wärme auch Entropie fließt. Aber für die Thermodynamik entscheidend ist, dass zusätzlich Entropie



entsteht, so dass nach dem Temperaturengleich mehr Entropie in dem System aus beiden Behältern ist als am Anfang. Das ist keineswegs ein kleiner Effekt, den man übergehen dürfte, sondern diese Entropiezunahme ist das Wesentliche an diesem Versuch überhaupt! Sie ist der eigentliche Antrieb für diesen Prozess: Die Entropiezunahme legt fest, dass der Wärmeaustausch vom heißeren zum kälteren Behälter erfolgt, aber eben niemals umgekehrt. Dieser entscheidende Aspekt wird vom KPK einfach verschwiegen. Die richtige Bildunterschrift unter Abb. 4 müsste also lauten: „Wärme fließt von dem inneren Behälter A in den äußeren Behälter B. Dabei bleibt die gesamte Energie unverändert, während die Gesamtentropie zunimmt.“

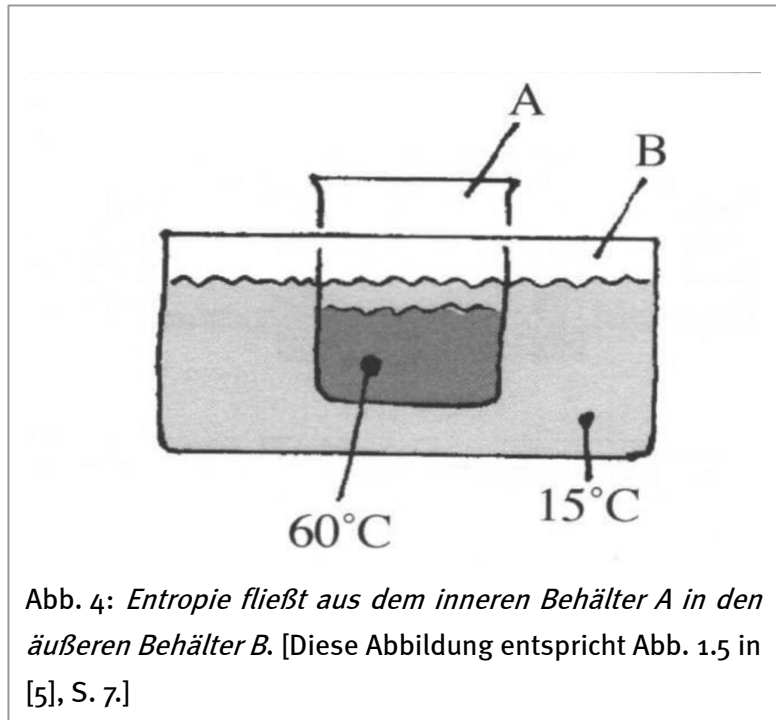


Abb. 4: *Entropie fließt aus dem inneren Behälter A in den äußeren Behälter B.* [Diese Abbildung entspricht Abb. 1.5 in [5], S. 7.]

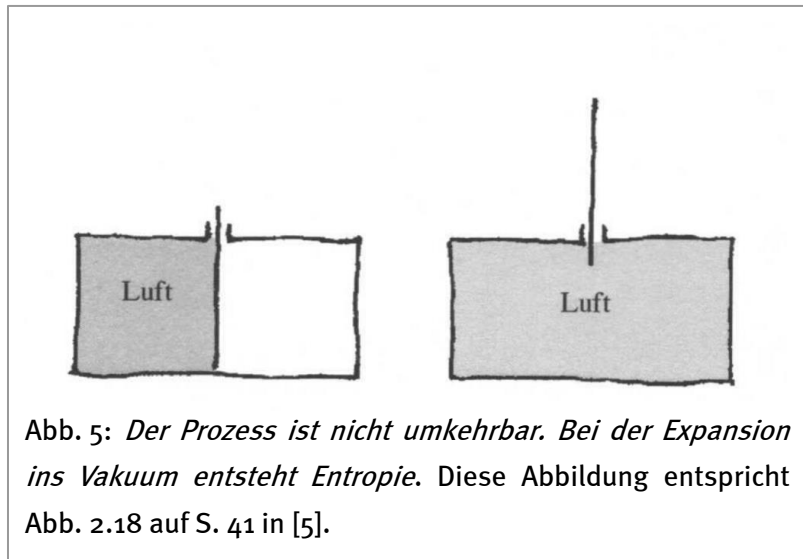
Man kann diesen Versuch natürlich auch ohne Entropie erklären, ohne dass die Schüler intuitives Verständnis verlieren, indem man feststellt, dass Wärme vom heißeren zum kälteren Körper fließt, solange eine Temperaturdifferenz existiert. Wenn man aber schon die Entropie einführt, wie es der KPK tut und was in diesem Beispiel eine Komplikation ist, dann muss man ihre Rolle bei Naturprozessen auch vollständig und richtig erklären. Gerade dies geschieht im KPK nicht.

### Expansion eines Gases ins Vakuum

Die spontane und irreversible Expansion eines Gases ins Vakuum ist ein weiteres Beispiel, an dem sich die Eigenschaften der Entropie erläutern lassen. Im Abschnitt 2.7 über irreversible Prozesse (S. 40f) in [5] wird dieses Phänomen auch vom KPK diskutiert (siehe Abb. 5). Bild und Unterschrift sind nicht zu beanstanden, aber der Begleittext schon, aus dem wir im Folgenden zitieren. Zunächst bemerkt der KPK: „Bei der Expansion eines Gases ins Vakuum entsteht Entropie.“ Dann wirft der KPK die Frage auf, ob das Gas bei dieser Expansion wärmer oder kälter werde und stellt dabei zwei Argumente gegenüber: „1. Es ist Entropie erzeugt worden. Wenn man einem Gas Entropie zuführt, nimmt die Temperatur zu. 2. Wir hatten früher gesehen, dass die Temperatur eines Gases abnimmt, wenn sich das Gas ausdehnt, – vorausgesetzt allerdings, wir lassen die Entropie konstant.“ Der KPK argumentiert nun, im diskutierten Fall seien beide Effekte wirksam, aber welcher gewönne, sei nicht leicht vorzusagen. Als Ergebnis wird angegeben: „Bei der Expansion ins Vakuum ändert sich die Temperatur eines Gases nicht. Die beiden Effekte heben sich in ihrer Wirkung also gerade auf.“ Man könne dies „als einen Zufall betrachten“, schreibt der KPK weiter.

Diese Diskussion der spontanen Expansion eines Gases in das Vakuum ist in mehrfacher Weise falsch:

Zu 1. Hier stolpert der KPK über seine eigene Definition, dass nämlich die Entropie nur erhöht werden kann, wenn Wärme zugeführt wird und sich damit die Temperatur erhöht. Physikalisch korrekt erhöht sich die Entropie aber allein wegen der Volumenzunahme. Die Temperatur bleibt dabei konstant. Das können nach dem KPK unterrichtete Schüler allerdings nicht wissen.



Zu 2. Hier verweist der KPK auf eine frühere Beobachtung, wo bei der Expansion eines Gases die Temperatur gesunken war. Dabei handelte es sich um eine adiabatische Expansion, bei der das Gas Arbeit verrichtet. Der KPK betont zutreffend, dass bei einem solchen Prozess die Entropie konstant bleibt, benutzt ihn aber – für uns nicht nachvollziehbar –, um die Expansion ins Vakuum zu erklären, bei der die Entropie zunimmt, wie der KPK schließlich selbst feststellt! Davon unabhängig sieht man sofort ein, dass sich die Temperatur des Gases nicht verändert, weil bei der Expansion ins Vakuum keine Arbeit nach außen verrichtet wird.

Fazit: Die beiden vom KPK behaupteten Effekte treten in der beschriebenen Situation überhaupt nicht auf, so dass das Ergebnis, dass die Temperatur bei der Expansion konstant bleibt, keineswegs ein Zufall ist, sondern notwendig so sein muss, wenn auch nicht aus den im KPK angegebenen Gründen. Dieses Ergebnis gilt streng für ideale Gase.

### Entropie-Leitfähigkeit

„Wovon hängt die Stärke des Entropiestroms zwischen zwei Stellen A und B ab?“ fragt der KPK auf S. 13f in [5]. Hinter dem Konzept eines Entropiestroms steht vermutlich die Analogie etwa zu Wasser- oder Elektrizitätsströmen. Beim elektrischen Strom zwischen zwei Punkten A und B hängt die Stromstärke von der Spannung zwischen A und B und der Leitfähigkeit des Drahtes ab. Die letztere berechnet sich aus dem Querschnitt, der Länge und der spezifischen Leitfähigkeit des Drahtes. Das Konzept des Stromes lässt sich auch direkt auf die Wärmeleitung übertragen, wobei eine materialabhängige Wärmeleitfähigkeit auftritt. Im Gegensatz zur Energie, von der die Wärme eine Form ist, ist Entropie aber keine erhaltene Größe (sondern eine Zustandsgröße!): Bei Punkt B kommt mehr Entropie an, als bei A abgeflossen ist, weil es sich beim Fließen um einen irreversiblen Prozess handelt, bei dem notwendi-

gerweise Entropie entsteht. Spätestens hier bricht die Analogie schon zusammen und mit ihr auch das Konzept einer materialabhängigen Entropieleitfähigkeit. Der KPK geht auf diese physikalische Tatsache überhaupt nicht ein, sondern gibt in Tab. 1.3 ([5], S. 14) Werte für die Entropieleitfähigkeit von Stoffen an, indem er einfach die Wärmeleitfähigkeit durch eine willkürlich gewählte mittlere Temperatur teilt. Dies ist nicht akzeptabel, weil dadurch abermals der fundamentale Unterschied zwischen Energie und Entropie verschleiert wird.

Der Versuch des KPK, neben der Temperatur allein die Entropie in den Mittelpunkt des Unterrichts über die Wärmelehre zu stellen, muss als physikalisch irreführend und immer wieder zu falschen Schlussfolgerungen führend angesehen werden. Er setzt zwei physikalisch unterschiedliche Größen gleich und begeht damit einen elementaren Fehler. Die an den Anfang gestellte, fundamental falsche Identifikation von Entropie und Wärme führt sofort zu Widersprüchen. Wie die oben beschriebenen Beispiele zeigen, fallen die Autoren des KPK zum Teil selbst darauf herein, wie z.B. bei der Expansion eines idealen Gases ins Vakuum. Wie könnte ein solcher Zugang für Schüler einfacher verständlich sein? Während die physikalisch richtige Erklärung der Entropie fehlt, dass sie nämlich über den Ablauf irreversibler Vorgänge entscheidet und angibt, wieviele Zustände ein System einnehmen kann, führt sie der KPK unnötigerweise als Komplikation ein, wo der Begriff der Wärmemenge ausreichen würde.

### ***Beispiel 3: Magnetische Ladungen und der Begriff des Vakuums in der Elektrodynamik***

#### **Magnetische Ladungen**

Der Band des KPK zur Elektrizitätslehre liefert ein besonders eindrückliches Beispiel dafür, wie das Streben nach Vereinheitlichung der Darstellung durch willkürliche Analogien zu Aussagen führen kann, die nicht nur experimentell nicht belegbar sind, sondern experimentellen Befunden eklatant widersprechen. Von Paul Dirac stammt die Spekulation, dass es magnetische Ladungen und einen magnetischen Monopol als Elementarteilchen geben könnte. Die Existenz magnetischer Ladungen würde in den Maxwell-Gleichungen die Asymmetrie zwischen der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte beheben. Trotz intensiver Bemühungen ist es bislang nicht gelungen, experimentell isolierte magnetische Ladungen nachzuweisen. Die Maxwellgleichungen (mit  $\text{div } \mathbf{B} = 0$ ) als Grundgleichungen der Elektrodynamik haben nach wie vor ihre Gültigkeit. Ursache für magnetische Eigenschaften von Materie sind entweder die mit den Spins gekoppelten magnetischen Dipole oder die von Stromverteilungen verursachten magnetischen Dipol- oder höheren Momente. Entgegen dieser experimentell verifizierten Tatsache, die auch in den Elektrodynamik-Unterrichtshilfen des KPK [2] anerkannt wird (S. 15), geht der KPK in dem Lehrbuch für die Sekundarstufe 2, Band 1, Elektrodynamik [3] von der Existenz magnetischer Ladungen aus (S. 41):

„Magneten können sich anziehen und abstoßen. Die Anziehung bzw. Abstoßung geht von der magnetischen Ladung  $Q_m$  aus. Die Stellen des Magneten, an denen die magnetische Ladung sitzt, nennt man die Pole des Magneten. Die Maßeinheit der magnetischen Ladung ist das Weber (Wb). Die magnetische Ladung kann, genauso wie die elektrische, sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Magnetisch positiv geladene Bereiche nennt man Nordpole, magnetisch negativ geladene Südpole.“

Das könnte für einen Schüler zunächst überzeugend klingen. Aber dann wird er fragen, wie man diese Ladungen räumlich trennen kann, so dass man von wirklichen Ladungen und nicht nur von Eigenschaften eines Stabmagneten sprechen kann.

Das naheliegende Experiment ist, den Stabmagneten auseinander zu sägen (vgl. Abb. 6). Wie wir wissen, entstehen dabei nur zwei neue Stabmagneten und keine isolierte Ladung. Das ist kein Einzelfall, sondern wie oben schon berichtet ist bisher die Suche nach magnetischen Monopolen erfolglos geblieben. Also gibt es für magnetische Ladungen bisher keine experimentelle Rechtfertigung.

Obwohl diese Tatsache den Autoren des KPK bekannt ist, formulieren sie in den Unterrichtshilfen [2]: „Die Frage ist nicht, ob es magnetische Ladungen gibt oder nicht, sondern ob ihre Einführung zweckmäßig ist“. Das nun ist ein Argument, das das Vorgehen des KPK in den Augen seriöser Wissenschaftler vollständig diskreditiert. Es ist ein offensichtliches Beispiel dafür, wie im KPK fundamentale physikalische Tatsachen zugunsten didaktischer Überzeugungen verbogen werden. Man könnte einwenden, dass es in der Elektrostatik eine Methode zur Lösung von Potentialproblemen mit gewissen Symmetrien der Ladungsverteilung und der Randbedingungen gibt, bei der so genannte Spiegelladungen eingeführt werden, die experimentell auch nicht nachzuweisen sind. Wie der Name schon nahelegt, stellen diese Spiegelladungen eine mathematische Methode zur Lösung von Randwertproblemen zur Verfügung. Die

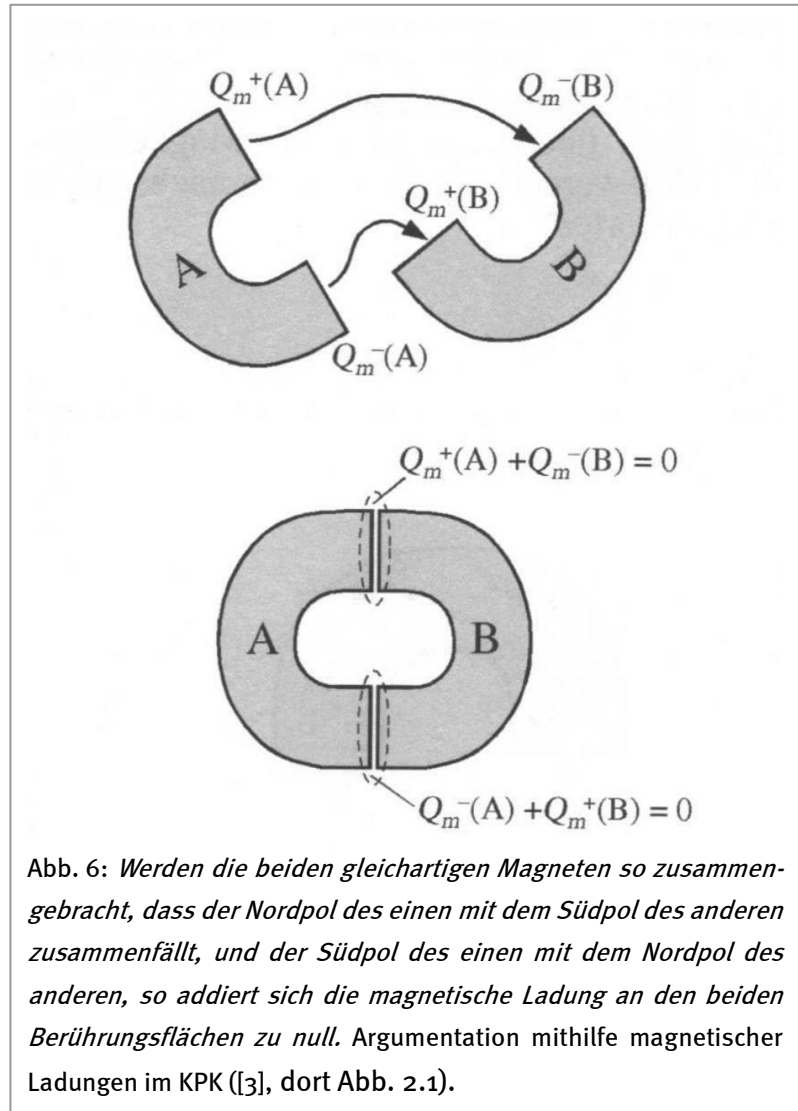


Abb. 6: Werden die beiden gleichartigen Magneten so zusammengebracht, dass der Nordpol des einen mit dem Südpol des anderen zusammenfällt, und der Südpol des einen mit dem Nordpol des anderen, so addiert sich die magnetische Ladung an den beiden Berührungsflächen zu null. Argumentation mithilfe magnetischer Ladungen im KPK ([3], dort Abb. 2.1).

Spiegelladungen werden in Raumbereichen angebracht, die physikalisch nicht relevant sind, und dienen dazu, die Randbedingungen zu erfüllen. Aus ihrer mathematischen Herleitung folgt, dass das berechnete Potential nur in dem physikalisch relevanten Raumbereich gilt und nicht in den Bereichen, in denen die Spiegelladungen sitzen. Die Arbeitsgruppe der Deutschen Physikalischen Gesellschaft ist der Ansicht, dass auch in der Schule nur experimentell belegbare Fakten vermittelt werden dürfen und dazu eine didaktische Methode gesucht werden muss und nicht umgekehrt physikalische „Fakten“ erfunden werden dürfen, damit die didaktische Methode möglichst elegant wird.

### Äther/Vakuum

Der KPK stellt sich die Frage ([4], S. 46): „Worin läuft die elektromagnetische Welle eigentlich? Wer oder was fungiert hier als Träger?“ Obwohl die moderne Physik beginnend mit den Experimenten von Fizeau sowie von Michelson und Morley die Existenz eines solchen Trägers ausgeschlossen hat, schreibt der KPK weiter ([4], S. 46): „Daraufhin [offenbar nach diesen Experimenten] gab man ihm [dem Träger] einen neuen Namen, denn mit dem Namen Äther verbanden sich zu viele veraltete Vorstellungen. Dieser neue Name ist ‚Vakuum‘, auf Deutsch ‚das Leere‘. Den Träger der elektromagnetischen Wellen nennt man ‚Vakuum‘. [...] Wenn man sagt, in einem Raumbereich befindet sich Vakuum, so meint man, dass sich dort zwar keine Materie im Sinne der Chemie befindet, wohl aber etwas anderes: eben der Träger der elektromagnetischen Welle. Solange keine Welle durch das Vakuum läuft, befindet sich das Vakuum in seinem ‚Grundzustand‘“.

Durch die Experimente von Fizeau bzw. von Michelson und Morley kamen die Physiker zu der Überzeugung, dass es für elektromagnetische Wellen kein bevorzugtes Bezugssystem und damit auch kein Trägermedium gibt. Dies führte zur Formulierung der speziellen Relativitätstheorie und der Lorentz-Invarianz, die heute mit einer relativen Genauigkeit von  $10^{-17}$  experimentell überprüft ist. Der KPK argumentiert dagegen, dass durch die Experimente zwar die Bezeichnung Äther abgeschafft wurde, dass aber trotzdem die elektromagnetischen Wellen immer noch ein Trägermedium (ähnlich wie die Schallwellen) hätten. So dargestellt, entsteht eine mindestens irreführende, wenn nicht falsche Vorstellung. Elektromagnetische Wellen entstehen dadurch, dass zeitliche Änderungen elektrischer Felder eine magnetische Ringspannung und zeitliche Änderungen magnetischer Felder elektrische Ringspannungen erzeugen. Sie sind nicht, wie etwa Schall- oder Wasserwellen, Störungen eines Trägermediums, die sich ausbreiten. Sie brauchen also weder den Äther noch das Vakuum als Trägermedium. Zwar kann man aufgrund der Quantenfeldtheorie das Vakuum als einen modernen Nachfolger des Äthers ansehen. Ein entscheidender Unterschied zum klassischen Äther ist aber, dass das Vakuum der Quantenfeldtheorie Lorentz-invariant ist, damit der Relativitätstheorie genügt und somit kein Bezugssystem auszeichnet.

Die hier aufgeführten Beispiele belegen, dass der KPK nach dem gegenwärtigen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis falsche Aussagen macht (Existenz magnetischer Ladungen oder Monopole) oder durch unpräzise Formulierungen falsche Vorstellungen hervorrufen kann (Vakuum).

## ***Mangelnde Anschlussfähigkeit***

Es ist die Aufgabe des Physikunterrichts, den derzeitigen Wissenstand der Physik so darzustellen, dass die Schüler Phänomene der Natur und technische Geräte des Alltags verstehen können. Dies betrifft Schüler, die auf ein eventuelles technisches oder naturwissenschaftliches Studium vorbereitet werden sollen, aber insbesondere auch solche, für die der schulische Unterricht die einzige Gelegenheit ist, mit einem zutreffenden physikalischen Weltbild ausgestattet zu werden. Dazu muss sich die Schulphysik an die national und international gebräuchlichen Begriffe halten, die den Dialog innerhalb und außerhalb der Physiker-Gemeinschaft überhaupt erst ermöglichen und sich bei experimenteller Überprüfung bewährt haben. Der Impulsstrom des KPK genügt diesen Anforderungen nicht, was man daran sieht, dass dieser Begriff in gebräuchlichen national und international verbreiteten Lehrbüchern für Studierende der Physik überhaupt nicht vorkommt. Dazu braucht man nur die Stichwortverzeichnisse verschiedener Lehrbücher anzuschauen. Im Index des Lehrbuchs Gerthsen Physik [6] wird 14-mal auf den Begriff der Kraft hingewiesen, aber kein einziges Mal auf einen Impulsstrom. Bei dem aus dem Amerikanischen übersetzten Lehrbuch von Halliday [7] sieht es ähnlich aus: 13 Hinweise auf die Kraft, aber kein einziger auf einen Impulsstrom. Weiterhin führt der KPK als Maßeinheit des Impulses die Einheit Huygens [Hy] ein. Diese Maßeinheit kommt aber in den Lehrbüchern oder auch im Taschenbuch der Physik [8] nicht vor. Nur der Kraft wird eine eigene Einheit, das Newton, zugeordnet. Ebenso wie auf den Impulsstrom treffen diese Feststellungen auf die vom KPK eingeführten magnetischen Ladungen mit der ihnen zugeordneten, aber außerhalb des KPK bereits anders definierten Einheit Weber zu, oder auf die Einheit Carnot für die Entropie. Der KPK lehrt also die Schüler Konzepte und Einheiten, mit denen sie außerhalb ihres KPK-Unterrichts in der Schule nichts anfangen können.

Wenn Autoren meinen, die Physik müsse anders dargestellt werden, weil andere Konzepte, andere Begriffe und andere Maßeinheiten adäquater seien – wofür es gute Gründe geben mag – dann kann diese Diskussion nur nach den seit über 400 Jahren bewährten Regeln der empirischen Naturwissenschaft Physik geführt werden. Andernfalls kann der Anspruch, Physik wissenschaftlich fundiert darzustellen, nicht eingelöst werden. Die Feynman Lectures [9] oder der Berkeley Physics Course [10] sind berühmte und erfolgreiche Beispiele, wie neue Konzepte der Darstellung sogar sehr befruchtend gewirkt haben. Der KPK ignoriert diesen Weg.

## **Fazit**

Konzepte wie der Impulsstrom, die magnetischen Ladungen oder das Vakuum als Träger elektromagnetischer Wellen wurden vom KPK in der durchaus löblichen Absicht in die Physik eingeführt, den Schülern das Verständnis der physikalischen Vorgänge zu erleichtern. Doch selbst wenn diese Konzepte für die Schüler eingängiger wären, stellt das keinen Gewinn dar, denn die Schüler lernen etwas, was vom wissenschaftlichen Standpunkt fragwürdig und teilweise nachweislich falsch ist. Ferner werden diese Konzepte des KPK auf eine Weise formuliert, die kein anderer Techniker oder Wissenschaftler versteht.

Auf besonders eklatante Weise falsch und irreführend ist die Behauptung des KPK, die Entropie sei das, was man „umgangssprachlich Wärme“ nenne. Die Entropie ist eine von der Energie und damit auch von der Wärme strikt zu unterscheidende Größe, die aufgrund ihrer fundamentalen Bedeutung durchaus im Schulunterricht vorkommen sollte. Dann muss sie aber zutreffend als diejenige Zustandsgröße eingeführt werden, die entscheidet, welche Energieumwandlungen möglich sind oder in welcher Richtung bestimmte Vorgänge wie die Wärmeleitung oder die irreversible Ausdehnung eines Gases ablaufen.

Vom Physikunterricht in der Schule muss zumindest verlangt werden, dass er auch in der Zukunft die Physik so darstellt, wie sie aufgebaut ist und betrieben wird: Als eine experimentelle Naturwissenschaft, die ihre Begriffe durch Messvorschriften belegt und aufgrund präziser Definitionen ihrer Konzepte zu objektivierbaren Aussagen gelangt.

Der KPK vermittelt kein zutreffendes physikalisches Weltbild. Zugunsten einer didaktischen Überzeugung führt er fragwürdige neue Konzepte ein, ignoriert oder verbiegt experimentelle Tatsachen und nimmt irreführende Analogien ebenso wie falsche Darstellungen in Kauf. Keine physikalische Ausbildung darf sich so etwas erlauben.

*Der KPK ist als Grundlage eines physikalischen Unterrichts ebenso ungeeignet wie als Leitlinie zur Formulierung physikalischer Lehr- oder Bildungspläne. Wir empfehlen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, mit allem Nachdruck dafür einzutreten, dass der KPK nicht in der physikalischen Ausbildung verwendet wird.*

## Literatur

- [1] Herrmann, Friedrich: Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Mechanik, 2. Auflage, Aulis Verlag 2010
- [2] Herrmann, Friedrich: Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Elektrodynamik Unterrichtshilfen, 4. Auflage, Aulis Verlag Deubner 2008
- [3] Herrmann, Friedrich: Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Elektrodynamik, 6. Auflage, Aulis Verlag 2010
- [4] Herrmann, Friedrich: Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Schwingungen, Wellen – Daten, 4. Auflage, Aulis Verlag 2010
- [5] Herrmann, Friedrich: Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Thermodynamik, 5. Auflage, Aulis Verlag 2010
- [6] Meschede, Dieter: Gerthsen Physik, 22. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag 2004
- [7] Halliday, David, Resnick, Robert und Walker, Jearl: Physik, Bachelor-Edition, Verlag Wiley-VCH, 2007
- [8] Stöcker, Horst: Taschenbuch der Physik, Verlag Harry Deutsch, 2010
- [9] Feynman, Richard. P., Leighton, Robert B. und Sands, Matthew: The Feynman Lectures on Physics, 15. Auflage, Addison-Wesley 1983
- [10] Kittel, Charles et al.: Berkeley Physik Kurs, 3. Auflage, Vieweg 1979