

Zum Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft über den Karlsruher Physikkurs

Christoph Strunk
Karsten Rincke

Experimentelle und Angewandte Physik / Didaktik der Physik
Universitätsstr. 31, D-93053 Regensburg

Dieser Text kann unter Verwendung folgender urn zitiert werden:
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:355-epub-300368>

Inhaltsverzeichnis

1 Hintergründe und Intention des vorliegenden Textes	1
1.1 Zusammenfassung	1
1.2 Grundlegendes zum Karlsruher Physikkurs	1
2 Der Impulsstrom in der Mechanik	2
2.1 Verhalten unter Drehungen	3
2.2 Messbarkeit der Richtung des Impulsstroms	3
2.3 Zur fachlichen Ergänzung des Gutachtens: Die Frage offener und geschlossener Integrationsflächen	5
3 Entropie und Wärme in der Thermodynamik	6
3.1 Temperaturlausgleich	7
3.2 Entropieleitfähigkeit	7
3.3 Freie Expansion	7
4 Magnetische Ladungen und der Begriff des Vakuums in der Elektrodynamik	8
4.1 Magnetische Ladungen	8
4.2 Zur fachlichen Ergänzung des Gutachtens: Die Frage der Interpretation der Quellen des \vec{H} -Feldes	9
4.3 Äther/Vakuum	9
5 Anschlussfähigkeit	10
6 Zusammenfassende Stellungnahme zum Gutachten	11
7 Additum: Der Karlsruher Physikkurs im Wettstreit mit konkurrierenden fachdidaktischen Konzepten	11
Literatur	12

1 Hintergründe und Intention des vorliegenden Textes

1.1 Zusammenfassung

Das von der DPG in Auftrag gegebene Gutachten über den Karlsruher Physikkurs (KPK) beklagt eine Reihe fachlicher Defizite. Die vorliegende Erörterung greift diese Kritik auf und setzt sie in Beziehung zu den Inhalten etablierter physikalischer Lehrbücher und zu den Originaltexten, in denen der KPK publiziert ist. Dazu sollen zunächst die im Gutachten der DPG beklagten Defizite fachlich beleuchtet werden. Weiter wird danach gefragt, ob die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen auf den KPK zutreffen. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass die Argumentation der Gutachter *in wichtigen Punkten nicht stichhaltig ist oder sich auf Aussagen bezieht, die im Text des KPK nicht enthalten sind.*

Es ist unser Ziel die Debatte über den KPK auf einer sachlichen Ebene zu führen.

1.2 Grundlegendes zum Karlsruher Physikkurs

Der KPK geht von der Feststellung aus, dass die Relation zwischen Strom, Stromdichte und durchströmter Fläche für die extensiven Größen Ladung, Energie, Entropie, Stoffmenge, Impuls und Drehimpuls jeweils dieselbe ist. Diese Herangehensweise fordert die Vorstellung heraus, da eine Vorstellung über das, was da jeweils fließt, nur im Fall der Stoffmenge mit alltagsgemäßen mentalen Bildern ausgemalt werden kann – in den anderen Fällen handelt es sich um abstrakte Größen, für die passende mentale Bilder im Unterricht erst geschaffen werden müssen.

Die Frage ist berechtigt, weshalb man als Lehrkraft ein Konzept wählen sollte, in dessen Zentrum die Vorstellung von der Strömung abstrakter physikalischer Größen steht. Eine Antwort kann wenigstens auf zwei Arten gegeben werden – empirisch oder pragmatisch. Der Versuch, die Frage empirisch zu beantworten, bedeutete, die Eignung des Konzepts *im Feld Schule* zu untersuchen. Empirische Untersuchungen zur Wirksamkeit fachdidaktischer Konzepte (sowohl des KPK wie auch vieler anderer Herangehensweisen) sind

unternommen und national wie international publiziert worden. Dass sie sich jedoch nicht in der Weise niederschlagen, dass sich Lehrkräfte, Lehrplanentwickler und Vertreter der Fachdidaktik schließlich auf das eine vermeintlich beste Konzept festlegten, hat viele Gründe. Ein Grund liegt darin, dass die Erwartungen an Bildungsergebnisse einem steten gesellschaftlichen Wandel unterworfen sind, sodass auch der Unterricht einer steten Veränderung, im günstigen Falle einer Fortentwicklung, unterworfen sein muss. Das Nebeneinander unterschiedlicher fachdidaktischer Konzepte kann als ein wichtiger Motor für eine solche Fortentwicklung begriffen werden, in Abschnitt 7 gehen wir nochmals darauf ein.

Eine pragmatische Antwort auf die Frage, warum man das Konzept wählen sollte, wäre der Hinweis, dass die in Rede stehenden Begriffe Ladung, Energie, Entropie, Stoffmenge, Impuls und Drehimpuls die gesamte Physik durchdringen. Sie müssen letztlich als abstrakte Größen verstanden werden, weil sie sich nur als abstrakte Größen für die Beschreibung einer unüberschaubaren Anzahl von verschiedenen Phänomenen als leistungsfähig erweisen. Es darf durchaus als wesentliche Aufgabe des Physikunterrichts angesehen werden – ob an der Schule oder an der Universität – dass er eine gewisse Vertrautheit mit diesen abstrakten Größen herstellen möge. Es kann als ein Vorzug des KPK angesehen werden, dass er die Abstraktheit der physikalischen Größen mit einer Metapher von suggestiver Kraft kombiniert – der Metapher des Fließens, die in Bezug auf Stoffmengen (z.B. von Wasser) her vertraut ist.

Die Entwickler des KPK sehen einen Vorteil dieser Darstellung darin, dass eine gemeinsame Perspektive für ursprünglich als verschieden angesehene Disziplinen der Physik entsteht, die es erlaubt – bei aller Verschiedenheit der betrachteten Phänomene – Querverbindungen und strukturelle Gemeinsamkeiten zu erkennen. Welches Gewicht dieses Argument für den KPK in letzter Konsequenz hat, kann wiederum entweder empirisch (s.o.) oder aber *normativ* beantwortet werden. Die normative Antwort wäre eine solche, die feststellt, ob es als ein wesentlicher Gewinn für die naturwissenschaftliche Grundbildung angesehen werden soll, dass eine solche vereinheitlichende Sichtweise vermittelt wird, oder ob dies zugunsten anderer Aspekte verzichtbar erscheint. Wohlgemerkt: Dies ist offenbar keine physikalisch-fachliche, sondern eine bildungstheoretische Frage.

2 Der Impulsstrom in der Mechanik

Die konzeptionelle Motivation des KPK speist sich aus der Tatsache, dass die Newton'schen Gesetze – trotz ihrer unzweifelhaften historischen Erfolge – in mindestens dreifacher Hinsicht dem heutigen Stand der Physik widersprechen:

1. Sie beinhalten Fernwechselwirkungen, bei denen die Bewegung eines Körpers durch instantane Änderun-

gen der Kräfte auf andere beliebig weit entfernte Körper übertragen wird. Dies widerspricht der Erkenntnis Einsteins, dass sich Kraftwirkungen stets mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten, und die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten können.

2. Das erste Newton'sche Gesetz setzt (ebenfalls im Widerspruch zur Relativitätstheorie) den absoluten Raum und die absolute Zeit Newtons voraus, ohne die nicht erklärt werden kann, was eine ›geradlinig-gleichförmige‹ Bewegung ist.
3. Die Gesetze versagen bei der Beschreibung punktförmiger Körper (oder Teilchen), wenn deren Abstände in Bereichen der de Broglie-Wellenlänge liegen.

Es stellt eine erhebliche Belastung für das Verständnis der modernen Physik dar, wenn zur Einführung der Physik ein Axiomensystem verwendet wird, das seit 100 Jahren als überholt anzusehen ist, weil es ein in wesentlichen Punkten unzutreffendes physikalisches Weltbild suggeriert. Eine experimentelle Falsifizierung der Newton'schen Gesetze liefert jedes kommerzielle GPS-System, das nicht funktionieren würde, wenn in die zur Positionsbestimmung verwendeten Algorithmen nicht die allgemein-relativistischen Korrekturen zu Newton'schen Gravitationstheorie berücksichtigt. Bisher steht jede Generation von Schülern und Studierenden vor dem Problem, dass sie das in den ersten Schul- und Studienjahren gefestigte Weltbild der klassischen Physik durch modernere Vorstellungen ablösen müssen, die dem widersprechen, was zuvor als unumstößliches Grundgesetz galt. Ein solcher Aufbau des Faches auf Grundlagen, die sich bereits vor langer Zeit als unhaltbar herausgestellt haben, wäre beispielsweise in der Mathematik undenkbar.

Das Ziel der Entwickler des KPK war es dieses Problem durch eine alternative Darstellung der Mechanik und der Elektrodynamik zu entschärfen, die von einem anderen Grundprinzip ausgeht, welches bis heute Gültigkeit hat. Dieses alternative Grundprinzip ist das der Impulserhaltung mit der entsprechenden Kontinuitätsgleichung. Die Frage, ob sich dieser Zugang in der Schule oder in der Universität besser oder schlechter als der traditionelle eignet, ist von der nach seiner fachlichen Korrektheit strikt zu trennen.

Im KPK werden die Newton'schen Gesetze als Ausdruck der Impulserhaltung in statischen Kraftfeldern interpretiert. Dabei fällt der Kraft die Rolle eines Impulsflusses oder Impulsstroms zu. Die Begriffe Kraft und Impulsstrom sind synonym. Der Ausdruck *Strom* verdeutlicht dabei, dass sich eine erhaltene Größe allein durch Zustrom oder Wegfließen, nicht aber durch Erzeugung oder Vernichtung ändern kann. Das 2. Newton'sche Gesetz bzw. die Kontinuitätsgleichung für den Impulsstrom legen das Vorzeichen des Kraftvektors bzw. des Impulsstromvektors relativ zur Zeitableitung des Impulses fest. Selbstverständlich hängt das Vorzeichen des Kraftvektors bzw. des Impulsstromvektors von der Wahl des Koordinatensystems ab.

Im Gegensatz zu anderen strömenden Größen wie der elektrischen Ladung, der Energie oder der Teilchenzahl bringt die Vektornatur des Impulses aber eine zusätzliche mathematische Komplikation, die aus einer für die Schule geeigneten Elementarisierung herauszuhalten ist. Weil die drei Impulskomponenten jeweils für sich einen Erhaltungssatz befolgen, ist die Impulsstromdichte \mathbf{G} , die zusammen mit der orientierten Fläche \vec{A} den Impulsstrom

$$\vec{F} = \mathbf{G} \cdot \vec{A} \quad (1)$$

bestimmt, kein Vektor, sondern ein Tensor zweiter Stufe, nämlich der aus der Elastizitätstheorie, der Elektrodynamik und der Hydrodynamik bekannte (negative)¹ Spannungstensor. Dessen Elemente bestimmen den mechanischen Spannungszustand eines elastischen Mediums. In den im Gutachten betrachteten eindimensionalen Beispielen werden diese Komplikationen vermieden.

2.1 Verhalten unter Drehungen

Im eindimensionalen Fall wird der mechanische Spannungszustand durch einen einfachen Skalar beschrieben, der positiv (Druckspannung) oder negativ (Zugspannung) sein kann, und dieses Vorzeichen bei Inversion oder Drehung der Koordinatensystems um 180° beibehält. Die im Gutachten beschriebenen vermeintlichen Inkonsistenzen entstehen dadurch, dass die Richtung des Kraftvektors bzw. des Impulsstromvektors fälschlicherweise nicht von der Strömungsrichtung der x -Komponente des Impulses unterschieden wird. Die in Abb. 2 des Gutachtens mit Pfeilspitzen versehenen gestrichelten Linie stellen nicht den Vektor des Impulsstroms dar (dieser ist identisch mit dem ebenfalls eingezeichneten Kraftvektor), sondern den Stromdichtevektor für positiven x -Impuls. Entsprechend steht bei den Vektoren auch ›Impuls‹ (um die Fließrichtung für positiven x -Impuls anzuzeigen), und nicht ›Impulsstrom‹. Dies wird in der Original-Bildunterschrift des KPK durch den Satz »...beide Male fließt x -Impuls in negativer x -Richtung« zum Ausdruck gebracht. In der von den Gutachtern hinzugefügten Abb. 2c bleibt dieser Satz richtig, weil durch die Drehung sowohl die x -Achse, als auch die Fließrichtung umgekehrt werden. Die Gutachter stellen korrekt fest:

»Der Vergleich von Abbildung 2a und 2c zeigt sehr anschaulich dass die Lage des KPK-Impulsstroms eng mit der Lage des Koordinatensystems verbunden ist.«

Dies ist folgerichtig und liegt nur daran, dass durch die Drehung des Koordinatensystems auch positiver in negativen x -Impuls übergeht. Wenn in einem elektrischen Stromkreis das Vorzeichen der strömenden Ladung umgekehrt wird, so ändert sich die Lage des elektrischen Stromdichtevektors in derselben Weise.

2.2 Messbarkeit der Richtung des Impulsstroms

Das Gutachten stellt korrekt fest, dass es das Prinzip *actio = reactio* unmöglich mache zu sagen, ob positiver Impuls nach links oder negativer Impuls nach rechts ströme. Es ist richtig, dass der mechanische Spannungszustand eines elastischen Mediums keine Strömungsrichtung auszeichnet. Andererseits tritt genau dasselbe Problem in der Elektrizitätslehre auf. Auch ein Amperemeter kann nicht entscheiden, ob positive Ladung nach links oder negative Ladung nach rechts fließt, weil die zur Messung ausgenutzte Lorentzkraft oder der elektrische Potenzialabfall in beiden Fällen derselbe ist. Die technische Stromrichtung wird durch die willkürliche Konvention festgelegt, dass die strömende Ladung positiv sei. In der Elektrizitätslehre wird aus dieser Willkür nicht geschlossen, dass dem elektrischen Strom »keine objektive Realität« zukomme, und für diesen »im Gebäude der Physik« deshalb »kein Platz« sei. Die im KPK benutzte Konvention zur Festlegung der Strömungsrichtung des Impulses ist zu der in der Elektrizitätslehre benutzten Konvention zur Festlegung der technischen Stromrichtung analog.

Das Fazit des Gutachtens (S. 6) »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« lässt außer Acht, dass der Impulsstrom mit der Kraft identisch ist. Von Seiten des KPK könnte derartigen Missverständnissen vorgebeugt werden, indem der Text stärker betonte, dass die Begriffe Kraft und Impulsstrom Synonyme sind.

Die Gutachter schließen aus der in Abb. 3a des Gutachtens bestehenden Spiegelsymmetrie, dass die Orientierung des in dieser statischen Anordnung fließenden und in sich geschlossenen Impulsstroms nicht experimentell bestimmt werden und dieser Impulsstrom daher nicht existieren könne. Diese Schlussweise ist nicht korrekt, weil der Wert des Impulsstroms gemäß Gl. 1 durch das Produkt aus der Impulsstromdichte \mathbf{G} (die in einer Dimension ein Skalar ist) und einer entweder im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn orientierten Fläche gegeben ist. Die Willkür bei der Orientierung dieses Flächenvektors entspricht dem Prinzip *actio = reactio* und macht die im KPK benutzte (oder eine andere) Vorzeichen-Konvention erforderlich. Eine von Null verschiedene Impulsstromdichte ist mit der Symmetrie der Anordnung verträglich, weil \mathbf{G} kein Vektor, sondern ein Skalar, bzw. in zwei und drei Dimensionen ein Tensor 2. Stufe ist. Aus diesem Grund sind die im KPK beschriebenen geschlossenen Impulsströme durch den Wert der Impulsstromdichte (der mechanischen Spannung) und der orientierten Fläche \vec{A}

¹Dieses Vorzeichen spiegelt die unterschiedlichen Vorzeichenkonventionen in der Kontinuumsmechanik und der Newton'schen Mechanik wider.

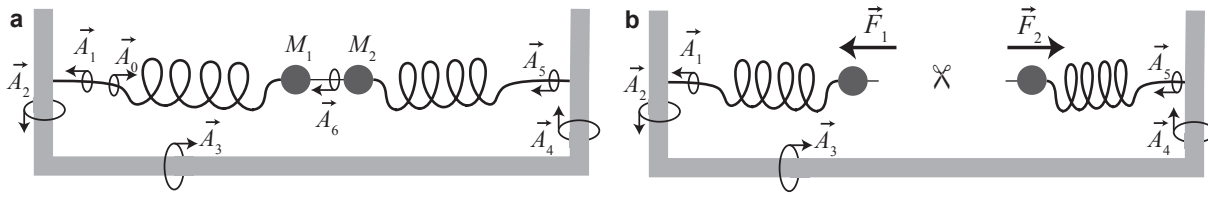


Abbildung 1: a Illustration eines geschlossenen Impulsstromkreises analog zu Abb. 3 des Gutachtens. Die Federkonstanten, die Längen L der Federn im entspannten Zustand und die Massen seien gleich, sodass die Anordnung perfekt symmetrisch ist. Die orientierten Flächen \vec{A}_1 bis \vec{A}_6 geben den Strömungspfad des geschlossenen Impulsstromkreises an. In den Federn besteht eine Zugspannung, in dem horizontalen Teil der Halterung eine Druckspannung. Die Impulserhaltung drückt sich dadurch aus, dass die Integration des Spannungstensors über jede dieser Flächen denselben Wert der x -Impulsstromstärke F_x (mit demselben Vorzeichen!) liefert. Entlang der Flächen \vec{A}_2 und \vec{A}_4 durch die senkrechten Teile der Halterung besteht eine Scherspannung, hier steht die Richtung des strömenden Impulses senkrecht auf der Stromrichtung; diese wird durch Nebendiagonal-Elemente des Spannungstensors beschrieben. Der durch die Fläche \vec{A}_1 fließende Impulsstrom gibt die Kraft an, mit der das linke Federende nach links gezogen wird ($F_{1x} < 0$). Wird das Vorzeichen der Fläche umgekehrt wie bei der Fläche \vec{A}_0 , so erhält man die nach dem Prinzip *actio = reactio* entgegengesetzt gleiche Kraft, mit der die Feder nach rechts zieht ($F_{0x} > 0$).

b Wird die Verbindung zwischen den beiden Kugeln mit den Massen M_1 und M_2 durchtrennt, so ist der Stromkreis unterbrochen und die Massen werden zunächst nach außen beschleunigt. Während die linke Kugel dabei positiven Impuls abgibt (\vec{F}_1), nimmt die rechte Kugel positiven Impuls auf (\vec{F}_2); dieser fließt nach der Vorzeichenkonvention des KPK über die Federn und die Halterung von der linken zur rechten Kugel. Unterschreitet die Länge der Federn deren Ruhlänge L , so kehren sich die Vorzeichen aller lokalen Spannungen sowie die Impulsstromrichtungen um. Die Kugeln werden abgebremst und es bildet sich bekanntlich eine harmonische Schwingung der Kugeln um die Ruhlänge der Federn aus. Im Anfangszustand in **b** sind die Kräfte auf die Kugeln/die Impulsstromstärken maximal, die Geschwindigkeiten dagegen Null, genau wie in der statischen (!) Anordnung in **a**. Daher muss auch in **a** ein konstanter, aber von Null verschiedener Impulsstrom fließen, dessen Vorzeichen durch die gewählte Orientierung der Flächen gegeben ist. Entscheidet man sich gegen die Vorzeichen-Konvention des KPK und orientiert alle Flächen um, so ändert sich die Strömungsrichtung des Impulses und es fließt nach dem Durchtrennen der Verbindung zunächst negativer Impuls von der rechten zur linken Kugel – physikalisch handelt es sich aber um denselben Vorgang!

eindeutig bestimmt. Dies wird in Abbildung 1 des vorliegenden Textes illustriert, die eine der zum Gutachten analoge symmetrische Situation sowohl im statischen als auch im dynamischen Fall darstellt.

Die Gutachter kritisieren außerdem, dass die Etikettierung »positiver Impuls« von Bezugssystem abhängig ist, wohingegen das Vorzeichen einer Ladung absolut, d.h. unabhängig vom gewählten Koordinatensystem festgestellt werden kann. Dieser Unterschied ist jedoch den Größen Ladung und Impuls inhärent und nicht für den KPK spezifisch. Er muss in jeder Darstellung der Physik auftreten. Andererseits ist es kein Einzelfall, dass die Werte bestimmter physikalischer Größen vom Bezugssystem abhängen: Die Relativitätstheorie sagt nicht, dass solchen Größen keine objektive Realität zukomme, sondern, dass die fundamentalen Gleichungen der Physik in einer Weise formuliert werden sollten, die unter Transformationen des Bezugssystems invariant ist. Dazu ist erforderlich, dass alle Größen, die in diese Gleichungen eingehen, bei Wechsel des Koordinatensystems in einer Wei-

se transformiert werden, welche die Form der Gleichungen erhält. Dieses Kriterium erfüllen sowohl der Impulsstromvektor (die Kraft) als auch der Tensor der Impulsstromdichte (der Spannungstensor).

Der Impulsstrom im KPK ist nichts anderes als eine konsequent verwendete Elementarisierung des in der Physik wohl-etablierten Konzepts des Spannungstensors.² Dass er sehr wohl einen »Platz im Gebäude der Physik« hat, wird auch dadurch illustriert, dass ihm in dem bekannten Lehrbuch Landau und Lifschitz (1991, S. 14ff.) ein ganzer Abschnitt gewidmet wird, der mit »Der Impulsstrom« überschrieben ist.

²Zum Begriff der Elementarisierung siehe z. B. Kattmann, Duit, Gropengießer und Komorek (1997).

2.3 Zur fachlichen Ergänzung des Gutachtens: Die Frage offener und geschlossener Integrationsflächen

In dem von derselben Gutachtergruppe verfassten Text *Ergänzende Bemerkungen zum DPG-Gutachten über den Karlsruher Physikkurs*³, datiert auf den 9. April 2013, schreiben die Autoren in der Zusammenfassung (S. 3): »Der KPK gibt die Newton'schen Axiome de facto auf und geht zur Kontinuumsmechanik über. Dies verschleiert, dass die Kontinuumsmechanik fundamental auf den drei Newton'schen Axiomen beruht.« Diese Aussage ist zwar richtig, aber sie verschleiert ihrerseits, dass die so hergeleitete Kontinuumsmechanik nur der Grenzfall einer allgemein-relativistischen Kontinuumsmechanik ist, in der die Newton'schen Gesetze nicht mehr gelten. Aus diesem Grund ist die Impulserhaltung als fundamentaler als die Newton'sche Gesetze anzusehen, denn letztere sind mit der modernen Physik nicht kompatibel. Die Frage ist, ob es der KPK erlaubt die fachlichen Inhalte und grundsätzlichen Zusammenhänge der Schulphysik mit angemessenem Aufwand zu reproduzieren. Dies ist der Fall, weil nicht die Inhalte, sondern nur deren Interpretationen teilweise anders sind.

Weiter schreiben die Autoren: »Der korrekte Impulsstrom entsteht durch die Integration über geschlossene [Hervorh. im Orig.] Oberflächen. Stattdessen integriert der KPK über beliebige, insbesondere auch offene Flächen. Deswegen erfüllt der KPK im Allgemeinen die Impulserhaltung nicht, sondern täuscht insbesondere in statischen Situationen Impulsströme vor, in denen kein statischer Impuls fließt.« Dazu ist festzuhalten, dass die Gutachter nicht begründen, warum die Integration über offene Flächen unzulässig sein soll. Im Gegensatz zu dieser These ist es bei Strömungsvorgängen allgemein üblich über offene Flächen zu integrieren. So ist es bei der Wasserströmung durch ein Rohr oder der elektrischen Strömung durch einen Draht offensichtlich ausreichend über den Rohr- beziehungsweise Drahtquerschnitt zu integrieren, um die Stromstärke zu erhalten. Ließe man nur geschlossene Flächen zu, so erhielte man in allen Situationen, in denen geschlossene Stromkreise vorliegen, die Stromstärke Null. Aus dem Verschwinden eines globalen Stromes kann man aber niemals auf das Verschwinden der lokalen Stromdichte schließen, da sich Strombeiträge auf den verschiedenen Teilen der geschlossenen Fläche zu Null addieren können. Genau dies ist im oberen Teil der Abb. 2 in der Ergänzung zum Gutachten der Fall.

Offensichtliche Beispiele sind geschlossene elektrische Stromkreise und die Ringströmungen in den Ozeanen. In einem geschlossenen elektrischen Leiter kann durch Induktion ein Ringstrom angeworfen werden. Dessen Existenz lässt sich zwar nicht durch die Anhäufung von Ladung experimentell nachweisen, wohl aber durch das Magnetfeld, welches die

ser Strom erzeugt. Genauso äußert sich ein Impulsstrom in einem Medium durch die elastische Deformation des Mediums. Die Stärke der Deformation ist genau wie die lokale Impulsstromdichte eine lokale Größe und unabhängig davon, ob der Impulsstromkreis offen oder geschlossen ist. Dies wurde in Abb. 1a und b dieser Stellungnahme illustriert. Für die grundsätzliche Existenz eines Spannungszustands der Federn ist es unerheblich, ob dieser statisch festgehalten (geschlossener Impulsstromkreis in Abb. 1a), oder dynamisch veränderlich (offener Stromkreis in Abb. 1b) ist.

Die Schlussweise der Gutachter läuft darauf hinaus, die Existenz der Meeresströmungen mit dem Argument zu bestreiten, dass diese nur dadurch nachgewiesen werden könnten, dass sich der Meeresspiegel irgendwo signifikant ändere.

Nachdem die Gutachter das Beispiel des hydrostatischen Druckes bemühen, möchten wir dieses nutzen, um die Argumentation des KPK daran noch einmal zu erklären: Wir betrachten ein im homogenen Gravitationsfeld vertikal stehendes mit Wasser gefülltes Rohr, das am unteren Ende durch ein Ventil verschlossen ist. Entsprechend der Vorschrift der Gutachter integrieren wir den Spannungstensor des Wassers über die (geschlossene) Wasseroberfläche und stellen fest, dass ein (nach der KPK-Konvention) positiver Nettostrom von z -Impuls in das Wasser hineinfließt, weil der Druck am unteren Ende der Wassersäule größer als am oberen ist, während die Integration über die zylindrische Seitenfläche keinen Beitrag liefert. Warum setzt sich das Wasser nicht nach oben in Bewegung? Weil über das Gravitationsfeld (welches seinen eigenen Spannungstensor besitzt, der den Impulsübertrag durch das Gravitationsfeld beschreibt) ein entgegengesetzgleicher Nettostrom von z -Impuls wieder herausfließt, so dass der insgesamt auf das Wasser übertragene Impulsstrom verschwindet. Wird das Ventil geöffnet und Reibungseffekte vernachlässigt, so verschwinden die Druckdifferenz und damit der positive Beitrag zum Impulsstrom. Dann setzt sich die Wassersäule nach unten in Bewegung. Ist diese Form der Beschreibung wirklich komplizierter als die konventionelle?

Schließlich möchten wir noch auf die Bemerkung der Gutachter eingehen, dass mit der Eliminierung des 1. Newton'schen Axioms auch der Begriff des Inertialsystems verloren gehe. Wie in Falk und Ruppel (1975) in §30 ausführlich beschrieben, lassen sich Inertialsysteme unter ausschließlicher Verwendung der Impulsbilanz eines N -Körpersystems wie folgt definieren: Ein Inertialsystem liegt vor, wenn in diesem die Körper ausschließlich untereinander Impuls austauschen und der Schwerpunktsimpuls des N -Körpersystems konstant ist. Wenn letzteres nicht erfüllt ist, dann muss das N -Körpersystem mit einem weiteren System Impuls austauschen. Bei diesem weiteren System handelt es sich um das in Falk und Ruppel (1975) so bezeichnete Trägheitsfeld. Dieses ist nach dem Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie mit dem Gravitationsfeld identisch, da nicht unter-

³http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/kpk-ergaenzung.pdf

schieden werden kann, ob das betrachtete N -Körpersystem durch ein Gravitationsfeld beschleunigt wird, oder ob das zur Beschreibung verwendete Bezugssystem beschleunigt und damit kein Inertialsystem ist. Auch dieser Einwand der Gutachter ist damit nicht stichhaltig.

3 Entropie und Wärme in der Thermodynamik

Einführungen in die Wärmelehre leiden seit über 150 Jahren an den begrifflichen Schwierigkeiten, die mit den vielfachen Änderungen der Bedeutung des Wortes ›Wärme‹ in der Frühphase der Thermodynamik zusammenhängen. Diese Schwierigkeiten äußern sich auch darin, dass das Fach ›experimentelle Thermodynamik‹ in der Regel selbst an der Universität bei Studierenden unbeliebt ist. Die in der Physik heute übliche Erklärung des Wortes ›Wärme‹ lautet: »Wärme ist eine Form der Energie«. Leider ist diese Erklärung ziemlich inhaltsleer, denn die Energie ist mitnichten für die Wärmelehre spezifisch, sondern tritt in allen Gebieten der Physik auf. Will man die Energieform ›Wärme‹ gegen andere Formen der Energie nicht nur durch qualitative Vorstellungen (›Wärme ist ungeordnete Bewegung«), sondern auch durch messbare Größen abgrenzen, so führt offenbar am Begriff der Entropie kein Weg vorbei. An der Universität tragen neuere Lehrbücher (Kittel & Krömer, 2001, Schroeder, 2000, Stierstadt, 2010) dem dadurch Rechnung, dass die Entropie von vornherein über ihren Zusammenhang mit der Statistischen Physik eingeführt wird. Für Herangehensweisen im Schulunterricht erscheint dieser Weg verschlossen, weil die dafür nötigen Grundbegriffe in den gängigen didaktischen Konzepten nicht bereit gestellt werden. Die Einführung des Begriffs erfolgt – wie auch sonst oft – phänomenologisch.

Der KPK baut die Thermodynamik in einer mit der Fachwissenschaft konformen Weise von vornherein auf konjugierten Paaren von extensiven und intensiven Größen auf, anstatt die traditionell als nicht-exakte Differenziale beschriebenen Energieformen Wärme und Arbeit zu verwenden. Dazu verknüpft der KPK die Entropie mit den eher stofflichen Alltagsvorstellungen von der Wärme, ohne die Entropie (ebensowenig wie die Energie, die elektrische Ladung, oder den Impuls) zu einer neuen Art von Stoff zu erklären. Auf der Alltagsebene hat die Wärme keine Einheit (auch nicht Joule), weil nichts gemessen wird. Es ist hinlänglich dokumentiert, wie sehr der Alltagsbegriff der Wärme mit dem der Temperatur interferiert (vgl. etwa Duit, 1986). Die Einführung des physikalischen Begriffs der ›Wärme‹ stellt sich im Unterricht insofern als eine Standardsituation dar, als der Unterricht deutlich machen muss, was fachlich gemeint ist, und was nicht gemeint ist. Die dabei vorgenommenen Bedeutungszuweisungen sind *Setzungen*, sie ergeben sich *nicht zwingend* aus fachlichen Überlegungen, weil Alltagsbegriffe keine Fachbegriffe sind. Es ist nicht nur möglich, den Alltagsbegriff der

›Wärme‹ mit einem Fachbegriff Wärme zu verbinden, indem der Fachbegriff Wärme als Übertragungsform von Energie vorgestellt wird – mit demselben Recht kann man alternativ den Alltagsbegriff der ›Wärme‹ in die Nähe des fachlichen Entropiebegriffs rücken. In beiden Fällen werden Schülerinnen und Schüler Umdeutungen ihres Alltagsbegriffs vornehmen müssen, wenn sie fachlich argumentieren wollen.

Die Entwickler des KPK werben für ihre Art der Setzung mit dem Hinweis, dass die physikalische Größe Entropie den vorphysikalischen Alltagsvorstellungen der ›Wärme‹ in hohem Maße ähnele. Auf diese Weise werde ein intuitives Verständnis einer schwierigen Größe erreicht, welches von der statistischen Interpretation der Entropie unabhängig, aber mit dieser kompatibel ist. Die Beziehung zwischen der Entropie und dem thermischen Energie-Übertrag wird erst später hergestellt (zum Zusammenhang zwischen Chronologie der Einführung und begrifflicher Hierarchie sei auf die Ausführungen in Abschn. 7 verwiesen). Dieses Vorgehen ist dem in der Elektrizitätslehre analog: Auch dort werden zuerst die elektrische Ladung, der elektrische Strom und dann die elektrische Leitfähigkeit eingeführt. Erst später wird diskutiert, dass neben der elektrischen Ladung stets auch Energie übertragen wird.

Wenn man sich entschlossen hat, nicht die Energie, sondern zuerst die Entropie als für thermische Phänomene typische Größe einzuführen, braucht man auch eine Einheit. Im KPK wird dazu die Einheit Carnot (C_t) eingeführt. Sobald die Verbindung mit der Energie hergestellt ist, können auch die Einheiten von Entropie und Energie in Relation gesetzt werden: $C_t = J/K$.

Die Autoren des Gutachtens behaupten, dass im KPK die Entropie und der physikalische Fachbegriff Wärme gleichgesetzt werden. Diese Aussage ist jedoch im KPK-Lehrbuch nicht zu finden. Dort wird die Entropie als Basisgröße zur Beschreibung thermischer Phänomene eingeführt und festgestellt, dass diese viele Ähnlichkeiten mit dem habe, was im *Alltag* qualitativ als ›Wärme‹ bezeichnet werde. Diese Aussage des KPK ist ohne Zweifel richtig. Die Gutachter verkennen, dass die Verbindung zwischen Alltags- und Fachbegriff durch den Unterricht gesetzt wird und nicht von vornherein gegeben ist.⁴ Es ist unseres Erachtens nicht korrekt die Setzung *Alltagsbegriff ›Wärme‹ = Fachbegriff Wärme* für absolut zu erklären und auf dieser Basis einen fundamentalen Fehler zu identifizieren.

In dem Gutachten werden die Kommentare zur Wärmelehre unter den Überschriften *Temperaturausgleich*, *Expansion eines Gases ins Vakuum* und *Entropie-Leitfähigkeit* ausgeführt. Wir betrachten zunächst den ersten und den letzten der drei Punkte, weil diese eine enge inhaltliche Beziehung haben.

⁴Im Alltag ist beispielsweise mit dem Wort ›Kraft‹ oft nicht die physikalische Kraft, sondern die Energie gemeint (›Kraftstoff‹, ›Atomkraftwerk‹ etc.).

3.1 Temperatenausgleich

Die Gutachter stellen an den KPK eine besondere Anforderung: Statt auf Seite 7 in Herrmann (2010b) nur eine erste Einführung in die einfachsten thermischen Phänomene zu geben, wie man es von den ersten Seiten eines Lehrbuchs erwartet, fordern sie, dass die Erklärung dieser Phänomene bereits an dieser Stelle vollständig sein müsse: »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.«

Neben der den Grundannahmen für eine gelingende Elementarisierung widersprechenden (weil übermäßigen) Forderung ist die Aussage darüber hinaus unrichtig, weil der Zusammenhang zwischen Entropieübertrag und Energieübertrag bereits wenige Seiten später in Abschnitt 1.10 auf Seite 17 und die Entropieerzeugung beim Wärmeleitungsvorgang in Abschnitt 1.11 auf Seite 19 erklärt werden.

Wie ist der Vorwurf der Gutachter zu lesen? Wird dem KPK ernstlich vorgeworfen, dass 12 Seiten nötig sind, um die Gesamtheit des Phänomens der Wärmeleitung samt aller Größen einzuführen, die zu dessen quantitativer Beschreibung erforderlich sind?

3.2 Entropieleitfähigkeit

Die Gutachter sind der Meinung, dass das Konzept der Entropieleitfähigkeit nicht tragfähig sei, weil auf der kalten Seite eines Leiters mehr Entropie ankomme als von der heißen Seite wegströme. Jedoch ist zu beachten, dass die weggeströmte Entropiemenge tatsächlich proportional zur Temperaturdifferenz ΔT ist, wohingegen die erzeugte Entropiemenge proportional zu ΔT^2 ist. Der Wärmeleitungsprozess lässt sich ohnehin nur für hinreichend kleine ΔT durch einen linearen Zusammenhang zwischen ΔT und dem Entropiestrom I_S beziehungsweise dem Energiestrom I_E beschreiben. Das impliziert aber, dass nichtlineare Beiträge wie der durch die Entropieerzeugung vernachlässigbar sein müssen. Wenn dies bei hinreichend kleinem ΔT erfüllt ist, hängen die Proportionalitätsfaktoren $\sigma_S(T)$ und $\lambda(T)$ zwischen ΔT einerseits sowie I_S und I_E andererseits gemäß $\sigma_S(T) = \lambda(T)/T$ zusammen, wobei $\lambda(T)$ die konventionell über den Energiestrom definierte Wärmeleitfähigkeit ist. Die Proportionalität zwischen $\sigma_S(T)$ und $\lambda(T)$ ist durch die auf Flächen mit konstanter Temperatur für den Zusammenhang zwischen Energiestrom und Entropiestrom gültige Gleichung $I_E = T \cdot I_S$ (Gl. 10 in Abschnitt 1.10) begründet. Bei praktischen Messungen der Wärmeleitfähigkeit werden typischerweise Werte von ΔT im Bereich von 1% der Temperatur verwendet, um

die Gültigkeit der linearen Näherung sicherzustellen. Da die Messgenauigkeiten für die Absolutwerte von λ und T in der Regel im Bereich von einem Prozent liegen, ist es völlig angemessen und keineswegs willkürlich, den Mittelwert solcher kleiner T -Intervalle als Eintrag für die aus der Messung resultierende Wertetabelle von $\sigma_S(T)$ oder $\lambda(T)$ zu verwenden. Das Konzept der Entropieleitfähigkeit ist daher zwanglos vereinbar mit der konventionell über das Fourier'sche Gesetz definierten Wärmeleitfähigkeit.

3.3 Freie Expansion

Die Gutachter wenden ein, dass die in Abschnitt 2.7 gegebene Beschreibung der irreversiblen Expansion eines (nicht notwendigerweise idealen) Gases in das Vakuum unrichtig sei. Diese Behauptung gründet sich auf die Lesart der Gutachter, dass sich die auf Seite 41 des KPK angegebenen Beobachtungen

1. Wenn man einem Gas Entropie zuführt, nimmt die Temperatur zu,
2. wenn man ein Gas bei konstanter Entropie expandiert, nimmt die Temperatur ab.

direkt auf den Prozess der freien Expansion ins Vakuum beziehen. Dies geht aus dem Text aber nicht hervor. Die Autoren des KPK erinnern den Leser an dieser Stelle nur an diese bekannten Eigenschaften eines Gases, um mögliche Erwartungen für das Versuchsergebnis zu begründen. Um die bei diesem Prozess in der Realität auftretenden Komplikationen⁵ zu umgehen, werden nur der Anfangs- und der Endzustand vor und nach der Expansion betrachtet. Anstatt nun den komplizierten und im Detail schwer zu beschreibenden realen Prozess der irreversiblen Expansion zu betrachten, ersetzen die Autoren des KPK den realen Prozess durch die Verkettung zweier reversibler Ersatzprozesse, nämlich eine isentrope Expansion unter Arbeitsleistung, und eine isochore Erwärmung, bei der dem Gas die bei der Expansion im ersten Prozessschritt entzogene Energiemenge zusammen mit der entsprechenden Entropiemenge aus einem Wärmereservoir wieder zugeführt wird. Entscheidend für die Schlussfolgerung, dass die Temperatur eines (idealen) Gases bei der irreversiblen Expansion konstant bleibt, ist die Tatsache, dass der Anfangs- und der Endzustand des Gases bei dem realen und dem reversiblen Ersatzprozess identisch sind. Diese Tatsache rechtfertigt die Aussage des KPK, dass sich »beide Effekte in der Wirkung gerade aufheben«.

Ein solches Vorgehen wird von den Autoren konventioneller Lehrbücher (vgl. z. B. Nolting, 2005, S. 179) sogar als das einzig mögliche bezeichnet, weil die traditionelle Darstellung der Thermodynamik nur reversible Prozesse für quantitativ behandelbar erklärt. Dies liegt daran, dass bei irreversiblen

⁵Das im Ausgangsbehälter enthaltene Gas expandiert näherungsweise adiabatisch und kühlt sich daher zunächst ab, während das in den anfangs leeren Behälter einströmende Gas adiabatisch komprimiert wird und sich zunächst erwärmt, bis der Prozess der Wärmeleitung zu einem Temperatenausgleich zwischen beiden Behältern führt. Erst diese gemeinsame Endtemperatur kann mit der Anfangstemperatur verglichen werden.

Prozessen die Entropieänderung bekanntlich von der Summe der zu- und abgeführten Entropiebeiträge verschieden ist. Warum soll dieses von konventionellen Lehrbüchern vorgeschriebene Verfahren den Autoren des KPK nicht erlaubt sein?

Das Fazit der Gutachter zu diesem Teil des Gutachtens lautet: »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«. Im Gutachten werden Aussagen falsifiziert, die entweder im Text des KPK nicht enthalten, oder fachlich korrekt sind. Dagegen wird das Fehlen von wichtigen Aussagen moniert, die im Text sehr wohl enthalten sind.

4 Magnetische Ladungen und der Begriff des Vakuums in der Elektrodynamik

4.1 Magnetische Ladungen

Die Gutachter schreiben »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. Entgegen dieser experimentell verifizierten Tatsache, die auch in den Elektrodynamik-Unterrichtshilfen des KPK [2]⁶ anerkannt wird (S.15), geht der KPK in dem Lehrbuch für die Sekundarstufe 2, Band 1, Elektrodynamik [3]⁷ von der Existenz magnetischer Ladungen aus (S.41)«. Diese Passage überrascht in doppelter Hinsicht:

1. Es lässt sich schwerlich behaupten, dass die Nicht-Existenz magnetischer Monopole experimentell verifiziert sei. Dies stünde im ausdrücklichen Gegensatz zur in der empirischen Wissenschaft allgemein geteilten erkenntnistheoretischen Grundposition, nach der die

Nicht-Existenz eines experimentellen Befundes nur falsifiziert, niemals aber verifiziert werden kann.

2. Die Gutachter gehen davon aus, dass die im KPK mit dem Wort »magnetische Ladungen« bezeichneten Objekte magnetische Monopole seien. Dies steht im expliziten Gegensatz zum Text des KPK, in dem es auf eben dieser Seite heißt: »**Die gesamte magnetische Ladung eines Magneten ist Null** [Hervorhebung im Original]. Das ist anders als bei der elektrischen Ladung. Man kann einem Körper eine [...] geringe elektrische Nettoladung geben. Dieser Unterschied zwischen elektrischer und magnetischer Ladung ist sehr wichtig. Er hat zur Folge, dass es zwar elektrische Ströme (fließende elektrische Ladung) gibt, aber keine magnetischen Ströme (fließende magnetische Ladung).« Offenbar war es die ausdrückliche Absicht der Autoren des KPK, bei ihren Lesern genau dieses Missverständnis – dass magnetische Ladungen identisch mit magnetischen Monopolen seien – zu vermeiden, und auf den zentralen Unterschied zwischen frei beweglichen elektrischen und gebundenen magnetischen Ladungen hinzuweisen. Dennoch stellen die Gutachter weiter unten erneut fest: »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.«

Diese Aussagen im Gutachten stehen im Gegensatz zu denen in hochangesehenen klassischen Lehrbüchern. Beispielsweise liest man in dem neu bearbeiteten Gerthsen (Meschede, 2006, S. 363): »In gewissen Fällen liegt es jedoch nahe, an der Vorstellung räumlich konzentrierter »magnetischer Ladungen« festzuhalten. Bei langen Spulen oder Stabmagneten (Länge l) könnte man an den Polschuhen, wo praktisch alle \vec{B} -Linien aus- oder einströmen, annähernd punktförmige »magnetische Ladungen« oder Polstärken $\pm P$ anbringen, sodass sich das magnetische Moment der Spule oder des Stabes ergibt als $\mu = Pl$.«

Daher ist umso überraschender, dass das Gutachten mit der folgenden Aussage fortfährt: »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.« Auch hier werden Aussagen des KPK als falsch oder irreführend hingestellt, obwohl in etablierten konventionellen Lehrbüchern ähnliche Aussagen zu finden sind. Bei unvoreingenommener Betrachtung

⁶Herrmann (2002).

⁷Herrmann (2010a).

des Textes (Herrmann, 2010a, S. 41ff) wird offensichtlich, dass die KPK-Autoren von magnetischen Oberflächenladungen und nicht von magnetischen Monopolen sprechen – so wie andere konventionelle Lehrbücher auch (Meschede, 2006 Jackson, 1975).

Die Gutachter schreiben weiter: »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.« Wir halten diese Aussage für zustimmungsfähig und gehen davon aus, dass sie allgemein geteilt wird. Jedoch fehlt bis zu dieser Stelle (und auch im Folgenden) der Nachweis, dass die Autoren des KPK experimentelle Fakten erfunden hätten.

4.2 Zur fachlichen Ergänzung des Gutachtens: Die Frage der Interpretation der Quellen des \vec{H} -Feldes

In ihrer fachlichen Ergänzung des Gutachtens verwenden die Autoren – in überraschendem Gegensatz zu ihrem Gutachten – einige Seiten darauf, Dinge zu erklären, die im KPK ganz genauso gesehen werden, nämlich, dass die Quellen des \vec{H} -Feldes Senken der Magnetisierung \vec{M} sind. Dabei beharren die Gutachter allerdings auf ihrer Lesart, dass die im KPK beschriebenen magnetischen Ladungen magnetische Monopole im Sinne Diracs seien. Dass diese Lesart (bei positiver Betrachtungsweise) ein Missverständnis ist, wird beispielsweise im Vorlesungsskript von F. Herrmann⁸ deutlich, wo magnetische und elektrische Größen zueinander in Beziehung gesetzt werden und ausdrücklich von »magnetischen Scheinladungen« an den Enden eines Magneten die Rede ist. Noch ausdrücklicher: Es wird gesagt, dass die elektrische Ladungsdichte auf der magnetischen Seite Null zu setzen ist, »denn es gibt keine freie magnetische Ladung« (S. 52 unten).

Wie in der fachlichen Ergänzung von den Gutachtern festgestellt, ist es genauso möglich das B -Feld eines Dauermagneten durch die Ampere'schen Molekularströme, nämlich die gebundenen (elektrischen) Oberflächenströme $\mu_0 \text{rot } \vec{M}$ zu beschreiben. Dies liefert genau dieselben Beziehungen zwischen \vec{B} , \vec{H} und \vec{M} wie die im KPK zur Erklärung benutzten (ebenso gebundenen) magnetischen Oberflächenladungen. Letztere stellen das exakte Analogon der in Zusammenhang mit dielektrischen Medien auftretenden und ebenfalls an die Oberflächen gebundenen Polarisationsladungen dar. Wieder liegt ein Beispiel vor, in dem zwei verschiedene Erklärungen (magnetische Oberflächenladungen vs. elektrische Oberflächenströme) zu exakt derselben Phänomenologie führen und daher experimentell nicht zu unterscheiden sind. Gegen elektrische Oberflächenströme spricht, dass das Magnetfeld von

Dauermagneten in der Regel von Elektronenspins erzeugt wird, die sich bekanntlich nicht auf die orbitale Bewegung einer elektrischen Ladung zurückführen lässt.

4.3 Äther/Vakuum

Das Gutachten zu diesem Abschnitt beginnt wie folgt: »Der KPK stellt sich die Frage ([4]⁹, 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, (Anm. d. Gutachter)] gab man ihm [dem Träger (Anm. d. Gutachter)] 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 befinde 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‘.«

Die Autoren des KPK-Textes sagen hier deutlich, dass mit dem Wort Äther veraltete Vorstellungen verbunden seien, welche sie nicht teilten. Dennoch unterstellen ihnen die Gutachter eben jenes veraltete Verständnis, nämlich dass mit dem Wort »Träger« dasselbe gemeint sei wie mit dem Begriff »Äther« zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Dieser Unterstellung zu folgen erscheint uns unfair, sagen die KPK-Autoren doch schon in der nachfolgenden Passage »Man glaubte aber zunächst, Licht sei eine mechanische Welle in diesem Äther, eine Welle bei der sich der Träger bewegt, genauso, wie sich bei Schallwellen die Luft bewegt.« Die Autoren des KPK distanzieren sich also ausdrücklich von jenem inzwischen verworfenen Äthermodell. Ungeachtet dessen kommentieren die Gutachter weiter: »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.« Es wird unseres Erachtens zu Unrecht unterstellt, dass die KPK-Autoren den elektromagnetischen Wellen ein Trägermedium von derselben Natur wie den Schallwellen zuschrieben.

Bemerkenswert ist, dass die Gutachter nachfolgend äußern: »Sie [elektromagnetische Wellen, Anm. d. Autoren] »brauchen also weder den Äther noch das Vakuum als Trägermedium«, diese Überzeugung aber gleich im nächsten Satz wieder relativieren: »Zwar kann man aufgrund der Quantenfeldtheo-

⁸<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/skripten> (19. April 2013).

⁹Herrmann (2010c)

rie das Vakuum als einen modernen Nachfolger des Äthers ansehen«. Genau diese Aussage macht auch der KPK auf Seite 46. Die Gutachter stellen weiter klar: »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.« Dies ist ohne Zweifel richtig. Entsprechend steht im KPK-Text an keiner Stelle, dass das im KPK diskutierte Trägermedium ein Bezugssystem auszeichne. Wie sollte das Vakuum auch ein Bezugssystem auszeichnen?

Die These des Gutachtens »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)« lässt sich auch für dieses Beispiel nicht durch Textstellen im KPK belegen.

5 Anschlussfähigkeit

Die Anschlussfähigkeit ist eine wichtige Frage, die inhaltlich diskutiert werden sollte. In dem Gutachten wird diese Frage zwar aufgeworfen, jedoch nur in einem recht eingeschränkten Sinn beantwortet: »Es ist die Aufgabe des Physikunterrichts, den derzeitigen Stand der Physik so darzustellen, dass Schüler die Phänomene der Natur und technische Geräte verstehen können. [...] 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.«

Nachdem das Gutachten zuvor ausführlich die fachliche Relevanz des ›Impulsstroms‹ negiert hat, beschränkt sich das Gutachten nun darauf, festzustellen welche Begriffe allgemein verwendet werden. Das Abzählen von Stichwortverzeichnissen ist unseres Erachtens keine geeignete Methode, um festzustellen, welche Begriffe in der Wissenschaftsgemeinschaft in welchem Maße geteilt werden. Selbst für den Fall, dass man entsprechende Resultate als Indizien für die Ablehnung oder Annahme eines Begriffs verwenden wollte, weisen wir darauf hin, dass die uns vorliegende Ausgabe des Gerthsen (Meschede, 2006) den Begriff des Impulsstroms an mehreren Stellen im Fließtext verwendet (S. 171 und 239), sodass die Kompatibilität dieses vollständig mit der Kraft identischen Begriffes mit konventionelleren Darstellungen der Physik

gegeben zu sein scheint. Andere angesehene Bücher verwenden diesen Begriff ebenfalls – in Landau und Lifschitz (1991) taucht der Begriff ›Impulsstromdichte‹ sogar in dem ansonsten sehr knappen Index auf.

Im Hinblick auf die Kritik der Gutachter an der Einführung von Einheiten, die in der Physik nicht allgemein verwendet werden, teilen wir den Standpunkt der Gutachter. Auch wenn diese aus der Sicht der KPK-Entwickler nützlich sein mögen, sind wir der Ansicht, dass die sich potenziell daraus ergebenden Kommunikationsprobleme vermieden werden sollten.

Insgesamt würden wir aber die Frage für wichtiger halten, welche Vor- oder Nachteile Schülerinnen und Schüler erfahren, die nach den KPK unterrichtet wurden, wenn sie eine Ausbildung oder ein Studium aufnehmen und später in das Berufsleben eintreten. In den Diskussionen um den KPK begegnet man immer wieder dem Hinweis, dass Schülerinnen und Schüler, die nach diesem Kurs unterrichtet wurden, nicht in gleicher Weise am öffentlichen Diskurs über naturwissenschaftliche Themen teilnehmen könnten, da sie den Umgang mit einem verbreiteteren Begriff wie dem der ›Kraft‹ nur am Rande gelernt und geübt hätten. Der Begriff des Impulsstroms sei im Alltag ungebräuchlich.

Das ist zunächst richtig. Richtig ist allerdings auch, dass der Kraftbegriff, wie ihn andere Konzepte einführen und wie er den Fachkolleginnen und -kollegen gewohnt ist, nur von einer Minderheit der Schülerinnen und Schüler mit den Vorstellungsbildern gefüllt wird, die im Physikunterricht intendiert sind. Nach einschlägigen Untersuchungen liegen die Vorstellungen von der ›Kraft‹ in der Nähe der ›Energie‹, der ›Vitalität‹ oder der ›Bewegung‹. Wenn im Alltag oder in populärwissenschaftlicher Literatur von ›Kraft‹ die Rede ist, muss man damit rechnen, dass die Kommunikationspartner ein buntes Bild von Vorstellungen aktivieren, und nur wenig daran wird an den Physikunterricht erinnern.

Aus den mit dem Fachbegriff Kraft verbundenen Verständnisproblemen darf man nun nicht schließen, dass der Begriff des Impulsstroms die bessere Wahl sei, ohne dies zuvor durch aussagefähige empirische Untersuchungen untermauert zu haben. Diese Arbeiten sollten Auskunft darüber geben, welche Erfahrungen die Schülerinnen und Schüler, die nach dem KPK unterrichtet wurden, und solche, die Mechanik auf dem Wege eines anderen Konzepts kennen gelernt haben, in Studium und Beruf nun tatsächlich machen.

Bezüglich der anschlussfähigen Gestaltung des KPK sehen wir auch dessen Entwickler in der Pflicht. Eine Aussage wie »Den Namen Impulsstromstärke für die Größe F gibt es seit Anfang des vorigen Jahrhunderts. Der Name Kraft für die Größe F ist aber heute noch weit verbreitet, ja er wird sogar viel häufiger gebraucht als der Name Impulsstromstärke« (Herrmann, 2010d, S. 32) halten wir zur Erreichung dieses Ziels für nicht geeignet. Unserem Verständnis nach wird hier der Versuch unternommen, darüber zu entscheiden, welcher der Begriffe

›Kraft‹ oder ›Impulsstromstärke‹ der zukunftsfähigere sei. So wie wir oben die Argumentation der Gutachter kritisiert haben, die auf das Zählen von Wörtern in einem Glossar hinaus lief, so kritisieren wir auch den Versuch der KPK-Autoren, darüber zu befinden, welcher Begriff in der Fachgemeinschaft vorzugsweise zu verwenden sei.

6 Zusammenfassende Stellungnahme zum Gutachten

Die in dem Gutachten aufgeworfenen fachlichen Fragen und die Frage nach der Anschlussfähigkeit sind selbstverständlich legitim. Wir hoffen diese Fragen so beantwortet zu haben, dass erkennbar ist, dass *die Grundideen des KPK fachlich richtig und die von den Gutachtern erhobenen Vorwürfe unberechtigt sind*.

In Bezug auf die Frage nach der Anschlussfähigkeit sind wir der Überzeugung, dass diese in nachhaltiger Weise nur durch belastbare empirische Untersuchungen beantwortet werden kann. Wir halten die Argumentation des Gutachtens in diesem Punkt für zu vordergründig und erlauben uns im folgenden noch einige Bemerkungen zur Wahrnehmung des KPK durch die Fachdidaktik und Fachwissenschaft.

7 Additum:

Der Karlsruher Physikkurs im Wettstreit mit konkurrierenden fachdidaktischen Konzepten

Die Diskussionen um den Karlsruher Physikkurs in den letzten zwei Dekaden haben gezeigt, dass der KPK immer wieder als fremdartig wahrgenommen wird. Wir formulieren an dieser Stelle eine Einschätzung dafür, woher diese Wahrnehmung rühren könnte.

Die Entwickler des KPK sind bei der Ausarbeitung einer fachlich wohlbegründeten konzeptuellen Idee gefolgt, es ist die Idee der Strömung physikalischer Größen. Folgerichtig beginnt der Kurs zur Mechanik in der Mittelstufe mit der Einführung des Impulses als mengenartiger Größe (Herrmann, 1995, S. 25ff.). Der Text diskutiert die Eigenschaften der für die Schülerinnen und Schüler neuen Größe in Zusammenhang mit den Größen Geschwindigkeit und Masse von Körpern und bettet dies in eine Reihe einfacher Beispiele aus dem Alltag ein, bevor auf Seite 39 die Impulsstromstärke eingeführt wird, die auf Seite 40 als ein Synonym zum Wort Kraft identifiziert wird.¹⁰ Die Entscheidung der Entwickler, die Strömung von Größen als Leitidee zu verwenden, bedingt eine bestimmte *Chronologie*, in der Begriffe eingeführt werden. Diese Chronologie bildet zugleich in gewisser Weise auch die Begriffshierarchie ab, nach der in diesem Kurs gearbeitet

wird – Grundbegriffe werden zeitlicher früher eingeführt als solche, die aus Grundbegriffen abgeleitet werden. Der Impuls tritt als Grundbegriff auf, auf den alle später folgenden Überlegungen zur Mechanik aufbauen. Die Entscheidung für eine bestimmte leitende Entwicklungsidee induziert also eine spezifische Begriffshierarchie, eine spezifische Ordnung der Begriffe, nicht aber, dass *neue physikalische Größen erfunden würden*.¹¹ Die (unzulässige) Gleichsetzung der vermeintlichen Neuigkeit von Begriffen mit der Neuigkeit der Ordnung alter Begriffe scheint uns ein wesentlicher Quell für viele Missverständnisse.

Es sei betont, dass die Entscheidung für eine bestimmte Leitidee in Zusammenhang mit jedem denkbaren Konzept eine jeweils eigene Chronologie der Einführung von Begriffen bedingt, und dass sich damit auch eine je eigene Ordnung der Begriffe heraus stellt. Um dies an einem anderen Beispiel deutlich zu machen, greifen wir uns das Konzept zur Mechanik heraus, dessen Grundideen in den 1970er Jahren von Walter Jung formuliert wurden, das in der Gruppe um H. Wiesner an der LMU München in den 1990er Jahren weiter ausgearbeitet wurde (vgl. u.a. Wiesner, 1994, Wodzinski & Wiesner, 1994a, Wodzinski & Wiesner, 1994b, Wodzinski & Wiesner, 1994c) und aktuell in weiter entwickelter Form als Lehrtext für den Schulgebrauch vorliegt (M. Hopf, T. Wilhelm, C. Waltner, V. Tobias, H. Wiesner¹²). Die Entwickler dieses Konzepts folgen der Idee, dass Bewegungen physikalisch nicht *ganzheitlich* zu beschreiben sind (wie das in Begriffen wie »Kreisbewegung« oder »geradlinige Bewegung« ungünstigerweise suggeriert wird), sondern Punkt-für-Punkt. Eine weitere zentrale Idee ist die der gegenseitigen Einwirkung von Körpern, die dann vorliegt, wenn eine Änderung von Richtung oder Tempo (Geschwindigkeitsbetrag) beobachtet wird. Diese Leitideen bedingen, dass das Konzept die Bedeutung des Terminus' *Richtung* betont, dass es von Anfang an einen vektoriellen Geschwindigkeitsbegriff vorsieht (anders als in vielen konventionellen Konzepten und im KPK), und dass es schließlich einen auf den ersten Blick ungewöhnlichen definitorischen Zusammenhang zwischen Kraft, Masse, Zusatzgeschwindigkeit und Einwirkungsdauer vorstellt: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$. Auch hier werden weder neue Begriffe, geschweige denn eine neue Physik produziert, sondern »nur« eine bestimmte Ordnung der Begriffe.

Verschiedene Ordnungen von Begriffen, wie sie durch unterschiedliche fachdidaktische Entwicklungsideen erzeugt werden, führen zu unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen im Unterricht, zu unterschiedlichen Eignungen zur Beschreibung von Phänomenenbereichen, und sie führen auch dazu, dass in je eigener Weise auf lernhinderliche Alltagskonzepte eingegangen werden kann. Wenn ein Konzept auf seine Eig-

¹⁰Durch die Einführung des neuen Wortes »Impulsstromstärke« wird das Problem der so genannten Polysemie gemildert, das immer dann entsteht, wenn Begriffe, die aus dem Alltag bekannt sind (»Kraft«), in der Physik mit neuen Bedeutungen belegt werden sollen.

¹¹Es sei der Hinweis gestattet, dass die Einführung von neuen Einheiten wie *Huygens* oder *Carnot* nicht mit der Einführung eines neuen Grundbegriffs zu verwechseln ist.

¹²Der Lehrtext ist unter http://www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch_Druckversion.pdf (19. April 2013) abrufbar.

nung für die Schule hin bewertet werden soll, dann wird man unterschiedliche Fragen an seine Wirkung richten: Wie ist die Qualität des erworbenen Wissens einzuschätzen? Welche persönlichen Einstellungen und Werthaltungen zur Wissenschaft Physik werden durch das Konzept begünstigt? In welchem Maß fördert es die Entwicklung von Motivation und Interesse? In welchem Maß gelingt es, lernhinderliche Alltagskonzepte zugunsten fachlich anschlussfähiger Konzepte aufzubauen?

Die Konkurrenz unterschiedlicher fachdidaktischer Konzepte stellt sich also als ein Wettstreit auf vielen Ebenen dar, der letztlich nur durch intensive empirische Arbeit überzeugend betrieben werden kann. Ein Reflex, Unvertrautes abzulehnen und womöglich die Erfahrungen aus der eigenen Schulbiografie als Referenz für das Befinden über Eignung oder Nichteignung von Unterrichtskonzepten zu verwenden, ist vor diesem Hintergrund nicht zielführend – zumal, wenn dieser Reflex von Hochschullehrern gezeigt wird, bei denen man davon ausgehen darf, dass sie stets zur Minderheit(!) derjenigen gehört haben, die über alle Unzulänglichkeiten und Widersprüche der schulphysikalischen Darstellungsweisen hinweg die Physik »verstanden« haben.

Literatur

- Duit, R. (1986). Wärmeverstellungen. *Naturwissenschaft im Unterricht*, 34 (13), 128 – 131.
- Falk, G. & Ruppel, W. (1975). *Mechanik, Relativität, Gravitation*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer.
- Herrmann, F. (1995). *Der Karlsruher Physikkurs – Energie, Impuls, Entropie*. Karlsruhe: Universitätsdruckerei Karlsruhe.
- Herrmann, F. (2002). *Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II Teil 1. Elektrodynamik Unterrichtshilfen*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. (2010a). *Der Karlsruher Physikkurs 1. Elektrodynamik. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. (2010b). *Der Karlsruher Physikkurs 2. Thermodynamik. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. (2010c). *Der Karlsruher Physikkurs 3. Schwingungen, Wellen, Daten. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. (2010d). *Der Karlsruher Physikkurs 4. Mechanik. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Jackson, J. D. (1975). *Classical electrodynamics*. John Wiley & Sons.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der didaktischen Rekonstruktion – ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (3), 3 – 18.
- Kittel, C. & Krömer, H. (2001). *Thermodynamik*. München, Wien: Oldenbourg.
- Landau, L. D. & Lifschitz, E. M. (1991). *Lehrbuch der Theoretischen Physik* (Bd. 6; W. Weller, Hrsg.). Berlin: Akademie.
- Meschede, D. (Hrsg.). (2006). *Gerthsen Physik*. Berlin u.a.: Springer.
- Nolting, W. (2005). *Grundkurs Theoretische Physik 4. Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Schroeder, D. V. (2000). *Thermal Physics*. San Francisco, Reading, New York, Harlow, Don Mills, Sydney, Mexico City, Madrid, Amsterdam: Addison Wesley Longman.
- Stierstadt, K. (2010). *Thermodynamik : von der Mikrophysik zur Makrophysik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wiesner, H. (1994). Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik. *Physik in der Schule*, 32, 122 – 127.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994a). Einführung in die Mechanik über die Dynamik. *Physik in der Schule*, 32 (5), 165 – 169.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994b). Einführung in die Mechanik über die Dynamik. *Physik in der Schule*, 32 (10), 202 – 207.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994c). Einführung in die Mechanik über die Dynamik. *Physik in der Schule*, 32 (10), 331 – 335.