

Protokoll eines Streitgesprächs über das DPG-Gutachten zum Karlsruher Physikkurs am 23. Mai 2013 in Regensburg

Jörg Hüfner* Christoph Strunk†
Karsten Rincke‡

12. Juni 2013

Dieser Text kann mit folgender urn zitiert werden:
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:355-epub-300340>

1 Zur Entstehung des vorliegenden Textes

Auslöser für das Streitgespräch war, dass die Professoren Christoph Strunk und Karsten Rincke eine kritische Stellungnahme (Strunk & Rincke, 2013) zu dem DPG-Gutachten (Lehn et al., 2013) an einen der Gutachter, den Professor Jörg Hüfner, sandten. Da eine Diskussion der vielen angesprochenen Probleme auf schriftlichem Weg vermutlich zu lange gedauert hätte, vereinbarten die drei Kollegen ein persönliches Treffen, zu dem die Regensburger einluden. Am 23. Mai 2013 fand eine universitätsöffentliche Diskussion in der Fakultät für Physik an der Universität Regensburg statt, die etwa 20 Interessenten anzog. Die Diskussion wurde angeregt und strukturiert durch zwei von J. Hüfner bzw. C. Strunk gehaltene Vorträge. Ersterer befasste sich im Schwerpunkt mit Betrachtungen zu Impulsströmen, Letzterer mit Fragen zur systematischen Bedeutung der Begriffe Entropie, Energie und Wärme. Die Diskussion wurde von 9:30h bis 12:30h und 14:30h bis 18h geführt. In einer Abendsitzung (19:30 - 22h) wurden die Inhaltspunkte des vorliegenden Ergebnisprotokolls diskutiert, gemeinsam verfasst und von den drei oben genannten Personen unterzeichnet. Das Protokoll wurde inzwischen noch stilistisch und inhaltlich überarbeitet und wird hiermit vorgelegt.

Gleich zu Beginn des Treffens wurde vereinbart, dass das Ziel des Treffens kein Rechthaben der einen oder anderen

*Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg

†Institut für experimentelle und angewandte Physik, Universität Regensburg

‡Didaktik der Physik, Universität Regensburg

Seite sein sollte, sondern es sollte um eine Klärung der kontroversen physikalischen Aussagen gehen. Schon das war schwierig genug, wie der Verlauf des Treffens zeigte. Denn das Hauptproblem bei solchen Streitgesprächen sind die unterschiedlichen Assoziationen und Bedeutungen, die den Begriffen von den einzelnen Kontrahenten beigelegt werden. Das zeigte sich besonders bei solchen Begriffen wie »Strom« oder »Wärme«, die auch in der Alltagssprache eine nicht scharf definierte Bedeutung haben. Nachdem es gelungen war, sich über die Terminologie (umgangssprachlich und fachlich) zu einigen, war es dann leichter, sich auch über die Beschreibung in der Fachsprache und in dem mathematischen Formalismus der Physik zu einigen.

2 Impulsströme

Impulsströme spielen eine wichtige Rolle im Karlsruher Physikkurs (KPK) bei der Behandlung der Mechanik. Die Analogie zu anderen Strömungsvorgängen (z.B. von Ladung) ist erwünscht, aber nicht immer unproblematisch, denn in dem einem Fall wird eine Vektorgröße (Impuls) und im anderen Fall eine skalare Größe (Ladung) transportiert. Um den Impulstransport in einem kontinuierlichen Medium zu beschreiben, gibt es zwei Fachbegriffe: die Impulsstromdichte \overleftrightarrow{T} und den Impulsstrom \vec{I}_p . Die Impulsstromdichte wird auch Spannungstensor genannt, und der Impulsstrom ist bis auf ein Vorzeichen gleich der Kraft \vec{F} .¹ Die Impulsstromdichte \overleftrightarrow{T} ist ein Tensorfeld (durch den Doppelpfeil kenntlich gemacht) und hängt von Raum und Zeit ab. Eine mögliche physikalische Interpretation der Impulsstromdichte ist, dass ihre neun Komponenten den Spannungszustand in einem Medium beschreiben. Die physikalische Interpretation der beiden Größen \vec{I}_p und \vec{F} ergibt sich aus ihrem Zusammenhang mit der Impulsstromdichte: Der Impulsstrom (oder die negative Kraft) ergibt sich, wenn man eine Integration der Impulsstromdichte \overleftrightarrow{T} über eine gerichtete Fläche \vec{A} ausführt:

$$-\vec{F} = \vec{I}_p = \int_{\vec{A}} \overleftrightarrow{T} d\vec{A} \quad (1)$$

Die Vektorpfeile über dem Differential $d\vec{A}$ und über der Fläche \vec{A} sollen andeuten, dass es auf die Orientierung der

¹Dass die zwei ganz unterschiedlichen Bezeichnungen Impulsstromdichte und Spannungstensor für dieselbe physikalische Größe benutzt werden, kann verwirren, weil beide Worte unterschiedliche Assoziationen hervorrufen. Der Grund für die doppelte Bezeichnung liegt wohl darin, dass der Formalismus der Kontinuumsmechanik so allgemein ist, dass damit ganz unterschiedliche Systeme wie z.B. ein strömendes Gas oder eine gespannte Feder behandelt werden können. In dem einen Beispiel strömen Teilchen, die einen Impuls tragen, so dass die Bezeichnung Impulsstromdichte das Geschehen anschaulich werden lässt. Bei dem anderen Beispiel, der eingespannten Feder, bewegt sich nichts, so dass das Wort Impulsstromdichte befremdlich klingt, während das Wort Spannung den Zustand des Systems anschaulicher beschreibt. Im vorliegenden Protokoll folgen wir dem allgemeinen Sprachgebrauch und benutzen beide Bezeichnungen nebeneinander.

Fläche ankommt. Bei Umkehr der Orientierung von $\vec{\mathcal{A}}$ drehen sich auch die Vorzeichen des Impulsstroms und der Kraft um. Die Größen \vec{F} und \vec{I}_p sind nicht lokal definiert (d.h. sie hängen nicht vom Ort ab), sondern sie sind globale Größen, die (ähnlich wie der magnetische Fluß Φ) nur in Zusammenhang mit der Fläche $\vec{\mathcal{A}}$ definiert sind. Die Fläche, über die integriert wird, kann offen oder geschlossen sein.² Eine einleuchtende physikalische Interpretation der Größen \vec{I}_p und \vec{F} ergibt sich, wenn man die Integration über die geschlossene Oberfläche eines massiven Körpers führt, wobei die Orientierung der Fläche nach außen gerichtet ist. Aus der lokalen Form der Kontinuitätsgleichung für den Impuls (verallgemeinerte Euler-Gleichung) folgt, dass die Divergenz des Spannungstensors mit der Zeitableitung der lokalen Impulsdichte verknüpft ist. Die Integration der Impulsdichte über das von $\vec{\mathcal{A}}$ eingeschlossene Volumen zeigt, dass die Kraft \vec{F} aus Gl. (1) gleich der Kraft ist, die gemäß der Newtonschen Bewegungsgleichung $d\vec{P}/dt = \vec{F}$ den Körper beschleunigt. Die äquivalente Schreibweise $d\vec{P}/dt + \vec{I}_p = 0$ lässt sich so deuten, dass beim Beschleunigen des Körpers ein Impulsstrom in den Körper hineinströmt. Wenn $\vec{\mathcal{A}}$ eine offene Fläche ist, dann ist \vec{F} die Kraft, die über die offene Fläche $\vec{\mathcal{A}}$ auf einen Körper einwirkt, und \vec{I}_p ist die Impulsstromstärke durch diese offene Fläche. Gl. (1) und der zugehörige Formalismus werden an dem folgenden Beispiel erläutert.

2.1 Joch mit gespannter Feder

Die Kritik der Gutachter am Gebrauch des Begriffs des Impulsstroms im KPK entzündete sich u.a. an der Abbildung aus dem Schulbuch Mechanik des KPK³, die hier als Abbildung 1 wiedergegeben wird. Da es das Ziel des Streitgesprächs war, die Sachverhalte, um die es in der Kontroverse DPG-KPK geht, zu klären, wollen wir an diesem recht transparenten Beispiel die verschiedenen Sichtweisen darstellen. Das System besteht aus einem Joch mit drei Schenkeln und einer Feder. Die Zugspannung, unter der die Feder steht, erzeugt in den Schenkeln Scher- und Druckspannungen, wie in Abbildung 2 gezeigt.

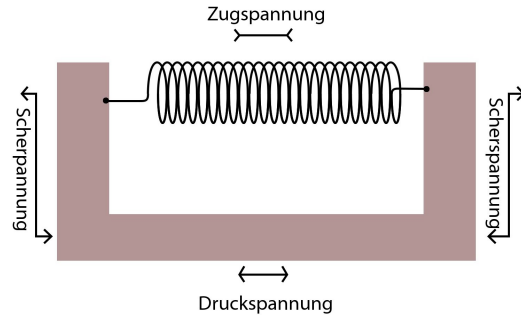


Abbildung 2: Darstellung der Spannungen in dem Joch mit eingespannter Feder. Die Richtungen der Pfeilspitzen deuten an, um welche Spannungen es sich handelt: Um Zugspannung in der Feder, Scherspannungen in den beiden Seitenschenkeln und eine Druckspannung in der Basis. Die Pfeilspitzen zeigen jeweils die Richtung der wirkenden Kraft an. Bei der Zugspannung sind es z.B. die Kräfte, die auf die beiden oberen Schenkelenden wirken. Diese werden durch die Gegenkräfte der Scherspannung kompensiert.

2.2 Kraft durch eine Fläche

Zunächst soll die Kraft, die auf eine Fläche wirkt, bzw. der Impulsstrom, der durch eine Fläche fließt, an Abb. 3 erklärt werden. In die gespannte Feder ist eine gedachte Fläche $\vec{\mathcal{A}}$ eingezeichnet, deren Orientierung nach links zeigt. Wegen der Spannung wirkt (nach Gl. (1)) auf diese Fläche eine Kraft \vec{F} , deren Richtung auch nach links zeigt. Diese lässt sich messen, indem die Feder an der Stelle der Fläche durchgeschnitten wird (ohne dass die Feder sich in ihrer Position verändert). Dann wird der rechte Teil der Feder entfernt und durch einen Probekörper ersetzt (unteres Bild von Abb. 3). Die Größe der Kraft lässt sich durch die Beschleunigung des Probekörpers messen.

In einem Gedankenexperiment lassen sich auch die longitudinale Spannungen und Scherspannungen durch die Verzerrung eines beliebig herausgegriffenen infinitesimalen Volumenelements bei Aufbau der mechanischen Spannung bestimmen. In der Praxis lässt sich bei transparenten Medien das Phänomen der Spannungs-Doppelbrechung verwenden, bei dem uniaxiale Spannungen eine optische Achse in dem zuvor isotropen Material auszeichnen.

2.3 Das mathematische Modell für den Spannungstensor

Um die Kräfte in der in Abbildung 2 gezeigten Anordnung berechnen zu können, wollen wir die Form des Spannungstensors vereinfachen. Dazu nehmen wir an, dass die Impulsstromdichte (bzw. der Spannungstensor) $\vec{T}(\vec{r})$ entlang der Feder oder jedes Schenkels unabhängig von \vec{r} ist, aber dass er in der Feder und den drei Schenkeln jeweils eine unterschiedliche Form annehmen kann. Da es sich um ein effektiv zweidimensionales System handelt, lässt sich dann

²Über diese Frage wurde in der Folge des DPG-Gutachtens viel diskutiert.

³Herrmann (2010b, S. 20)

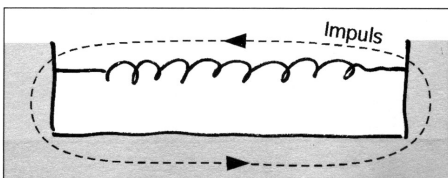


Abbildung 1: Impulsstrom ohne Antrieb (Beschriftung wie im Original).

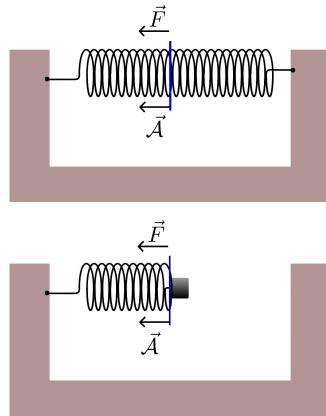


Abbildung 3: Kraft \vec{F} auf eine gedachte Fläche \vec{A} . **Oben:** Die schematische Anordnung von Feder und Joch mit der Fläche \vec{A} , die nach links orientiert ist. **Unten:** Die Feder ist an der Fläche durchschnitten und die rechte Seite der Feder wurde entfernt. Die Fläche \vec{A} ist jetzt ein Teil der Oberfläche des Probekörpers geworden. Damit wird verständlich, dass der Probekörper von der restlichen Feder nach links (in die Richtung der eingezeichneten Kraft) gezogen wird.

der Spannungstensor durch 2×2 -Matrizen mit konstanten Matrixelementen beschreiben. Sie sind in Abbildung 4 angegeben. Mit dieser Vereinfachung lassen sich die Kräfte und Spannungen an den verschiedenen Punkten des Systems auf einfache Weise berechnen: $\vec{I}_p = \overleftrightarrow{T} \cdot \vec{A}$. Abbildung 5 zeigt die so berechneten Kräfte und Impulsströme an verschiedenen Stellen des Systems, wobei die Orientierungen der Flächen willkürlich gewählt wurden. Wenn die Orientierung einer Fläche umgekehrt wird, dreht sich auch die Richtung der zugehörigen Kraft bzw. des zugehörigen Impulsstroms um. Es gibt also keine vom System ausgezeichneten Richtungen.

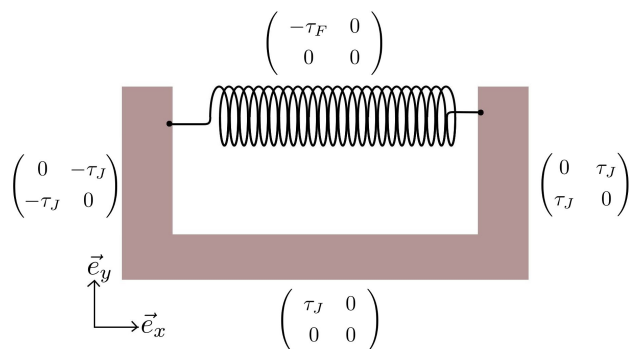


Abbildung 4: Die Form der Matrizen des Spannungstensors in der Feder und den Schenkeln. Die Stärke der Spannung ist durch die Konstanten $\tau_F > 0$ (Feder) bzw. $\tau_J > 0$ (Joch) beschrieben.

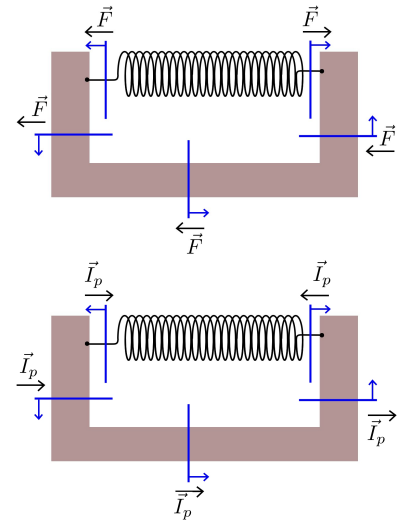


Abbildung 5: Kräfte \vec{F} (oben) und Impulsströme \vec{I}_p (unten) an verschiedenen Positionen im System aus Joch und Feder. Man beachte die jeweiligen Richtungen der Flächen (dargestellt durch blaue Linien).

2.4 Stromdichten der Impulscomponenten

Wenn man das untere Bild in Abbildung 5 mit Abbildung 1 aus dem KPK vergleicht, dann sind zunächst kaum Übereinstimmungen zu erkennen. Die in Abbildung 1 gezeigte und dort mit dem Wort »Impuls« versehene gestrichelte Linie ist also nicht der in Abbildung 5 gezeigte Impulsstrom \vec{I}_p . Dies war im Streitgespräch noch nicht klar geworden, sondern ergab sich erst als Ergebnis der Diskussionen der Details des vorliegenden Textes.

Die in Abbildung 1 gezeigte gestrichelte Linie ist jedoch mit der Stromdichte der x -Komponente des Impulses zu identifizieren. Diese wird mit $\vec{j}_x(\vec{r}, t)$ bezeichnet und ist wie die Stromdichten der y - und z -Komponente des Impulses durch folgende Gleichungen definiert

$$\begin{aligned} \vec{j}_x(\vec{r}, t) &= \overleftrightarrow{T}(\vec{r}, t) \cdot \vec{e}_x \\ \vec{j}_y(\vec{r}, t) &= \overleftrightarrow{T}(\vec{r}, t) \cdot \vec{e}_y \\ \vec{j}_z(\vec{r}, t) &= \overleftrightarrow{T}(\vec{r}, t) \cdot \vec{e}_z, \end{aligned} \tag{2}$$

worin die \vec{e}_x , \vec{e}_y und \vec{e}_z Einheitsvektoren in x , y und z -Richtungen sind (Herrmann & Schmid, 1984). Im Unterschied von zu den Strömen $\vec{I}_p(t)$, die höchstens noch von der Zeit abhängen können, handelt es sich bei den Größen $\vec{j}_i(\vec{r}, t)$ um Stromdichten, d.h. um Vektorfelder, die im Allgemeinen von Ort und Zeit abhängen. In die Definitionen in Gl. (2) gehen die Einheitsvektoren ein, deren Richtungen von dem jeweils gewählten Koordinatensystem abhängen. Aus der Kenntnis der neun Komponenten der Stromdichten aus Gleichungen (2) lassen sich die neun Komponenten des

Spannungs- oder Impulsstromdichtetensors \overleftrightarrow{T} rekonstruieren. In diesem Sinne sind die \vec{j}_x , \vec{j}_y und \vec{j}_z eine mögliche Visualisierung der mechanischen Spannungen in dem System.

In den Ingenieurwissenschaften werden Stromlinienbilder für die Impulskomponenten (s. Gl. (2)) als »Kraftflusslinien« bezeichnet und zur Visualisierung der mechanischen Spannungszustände in Werkstücken verwendet (Moldenhauer, 2012).

Mit Hilfe der Matrizen der vereinfachten Form des Spannungstensors aus Abbildung 4 lassen sich die in Gl. (2) definierten Stromdichten berechnen. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis. Wenn man das obere Bild von Abbildung 6 mit Abbildung 1 vergleicht, so erkennt man eine vollkommene Übereinstimmung. Der in Abb. 1 gezeigte und dort mit »Impuls« bezeichnete Ringstrom ist identisch mit der in Gl. (2) definierten Stromdichte der x -Komponente des Impulses. Dass dieser Strom im Gegenuhrzeigersinn fließt, ist keine Eigenschaft des Systems (also des Spannungstensors \overleftrightarrow{T}), sondern alleine des Koordinatensystems, d.h. der Wahl der Einheitsvektoren. Bei Wahl eines anderen Koordinatensystems könnte er auch in die entgegengesetzte Richtung fließen. Das steht in Übereinstimmung damit, dass in einem symmetrischen System, wie es unser Modellsystem eines ist, keine Richtung ausgezeichnet ist. Aufgrund der Symmetrie des Spannungstensors ist eine Scherspannung in x -Richtung $\vec{j}_x(\vec{r}, t)$ stets von einer solchen in y -Richtung $\vec{j}_y(\vec{r}, t)$ begleitet. Eine strikt homogene Verscherung ist nur möglich, wenn sowohl in x - als auch in y -Richtung externe Kräfte wirken. In der in unserem Beispiel vorliegenden Anordnung kann die Verscherung also nicht ganz homogen sein - eine genauere Behandlung sprengt jedoch den Rahmen dieses Protokolls.

3 Magnetische Ladungen

In Bezug auf die magnetischen Ladungen ergab die Diskussion, dass der Schulbuchtext des KPK noch deutlicher hervor heben sollte, dass es keine isolierten frei beweglichen magnetischen Punktladungen, und insbesondere keine magnetischen Monopole gibt. Auf diese Weise würde die im Lehrband bereits zu findende Feststellung, dass die im KPK so bezeichneten magnetischen Ladungen den gebundenen Oberflächenladungen eines Dielektrikums entsprechen, auch im Text des Schulbuches verankert.

4 Entropie

Die Kritik der Gutachter an der Thermodynamik des KPK entzündete sich an dem Satz: »Auch die (neben der Temperatur, Anm. d. Autoren) zweite Größe, die wir brauchen, müsstest du kennen, allerdings unter einem anderen Namen als dem in der Physik gebräuchlichen. Es handelt sich bei ihr

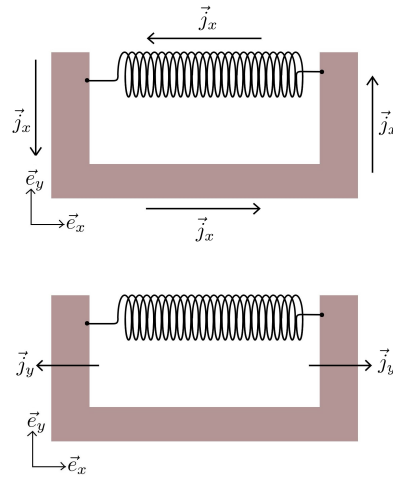


Abbildung 6: Die in Gl. (2) definierten Stromdichten für die x -Komponente des Impulses (oben) und für die y -Komponente (unten). Die Pfeile geben die in den Schenkeln bzw. in der Feder verlaufenden Stromdichten an. Die Stromdichten von \vec{j}_y verschwinden in der Feder und in dem unteren Schenkel.

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 « (Herrmann, 2010a, S. 5).

4.1 Begriffe im alltäglichen und fachlichen Gebrauch

Bei ihrer Kritik gingen die Gutachter stillschweigend davon aus, dass der Begriff Wärme, wie er in der Umgangssprache benutzt wird, mit dem Fachbegriff Energie gleichzusetzen ist. Diese Gleichsetzung scheint uns ähnlich problematisch zu sein wie die unhinterfragte Gleichsetzung des Alltagsbegriffes Wärme mit dem Fachbegriff Entropie im KPK. Ein wesentlicher Teil unserer Diskussion befasste sich deshalb mit der Analyse der alltäglichen Assoziationen zum Begriff Wärme und dem Zusammenhang mit den Fachbegriffen Energie, Entropie und Temperatur.

Dazu einige Beispiele: (1) Wenn jemand von einem »warmen« Zimmer spricht, dann macht er in den meisten Fällen eine Aussage über die Temperatur der Luft im Zimmer. (2) Beim »Erwärmen« des Zimmers wirken mehrere thermodynamische Prozesse zusammen: die (irreversible) Umwandlung von elektrischer oder chemischer Energie in Wärmeenergie und ihre Verteilung im Raum durch Diffusion und Konvektion. Umwandlung und Transport werden von einem Entropie-Zuwachs begleitet. (3) Manchmal wird auch ein Pullover als »warm« bezeichnet. In der Sprache der Physik ist die Wolle des Wollpullovers ein Wärmeisolator, der den Wärmestrom in die Umwelt reduzieren soll. Fachlich präzisiert lässt sich ein Wärmestrom als ein gemeinsamer Strom von Energie und Entropie auffassen. Der Antrieb für den Wärme-

strom ist eine anfänglich vorhandene Temperaturdifferenz. Im Verlauf des Temperatúrausgleichs durch Wärmeleitung wird ein Maximum der Entropie des Gesamtsystems erreicht. Schon diese wenigen Beispiele zeigen, dass bei der Übersetzung des Alltagsbegriffs »Wärme« in die Fachsprache der Physik und bei der Beschreibung der zugehörigen Phänomene alle drei Zustandsgrößen Temperatur, Energie und Entropie wesentlich sind. Die Begriffspaare Temperatur & Energie oder Temperatur & Entropie allein sind nicht ausreichend. Natürlich ist das keine neue Erkenntnis, aber ihre Wiederholung erscheint uns nützlich im Zusammenhang mit der Kontroverse, die der eingangs zitierte Satz ausgelöst hat.

4.2 Historische Anmerkung

Die Kontroverse um den Wärmebegriff im KPK und in den üblichen fachlichen Darstellungen lässt sich unter der Perspektive zu betrachten, welcher historischen Genese Fachbegriffe unterliegen. Der folgende Absatz deutet die Kontroverse unter der Fragestellung, wie sich der Status eines Begriffs in einer Begriffshierarchie entwickeln kann. Diese Deutung ist – wie es dem Wesen von Deutungen eigen ist – nicht die einzig mögliche.

Dazu sei zunächst betrachtet, wie sich der begriffliche Zusammenhang zwischen den Begriffen »Impuls«, »Energie« und »Bewegungsgröße« historisch entwickelt hat: Ursprünglich wurde der Impuls als »Bewegungsgröße« und die (kinetische) Energie als »lebendige Kraft« (Leibniz) bezeichnet. Die Bezeichnung »Bewegungsgröße« hat sich heute als Oberbegriff für die Fachbegriffe Impuls und Energie etabliert und ist selbst keine gebräuchliche physikalische Größe mehr, der Begriff »lebendige Kraft« wurde aufgegeben. Die Bedeutung des Begriffs »Bewegungsgröße« hat sich also verändert, und zwar von einem Fachbegriff hin zu einem Oberbegriff.

In der Entwicklung der begrifflichen Trias von (thermischer) »Energie«, »Entropie« und »Wärme« kann ein ähnlicher Zusammenhang gesehen werden: Wenn die Begriffe Entropie, Energie und Temperatur ausreichen, um thermodynamische Prozesse zu beschreiben, dann scheint der Begriff der »Wärme« nicht zwingend nötig. Er könnte also in der Thermodynamik einen ähnlichen Status erhalten wie der der »Bewegungsgrößen« in der Mechanik, und zwar den Status eines Oberbegriffs für die Gruppe der drei direkt zueinander in Beziehung stehenden Größen E , T und S , wobei das Wort Wärme selbst keine gebräuchliche physikalische Größe mehr bezeichnet. Der Ausdruck »Wärmelehre« anstelle von Thermodynamik wäre ein Beispiel.

5 Schlussbemerkung

Die Ausarbeitung des vorliegenden Textes zeigte einmal mehr, wie wichtig für das Ziel einer fachlichen Klärung das Ringen um das sachliche Detail ist. Dabei erwies sich die im

persönlichen Kontakt mündlich geführte Diskussion ebenso wichtig wie der anschließende Prozess des Schreibens, in dem die Argumente Gestalt annehmen sollten und dabei zum Teil nochmals überdacht werden mussten.

Wie der vorliegende Text zeigt, war es möglich, aus sehr unterschiedlichen Anfangspositionen heraus eine für beide Seiten fachlich vertretbare Perspektive zu entwickeln, von der wir hoffen, dass sie einerseits zur inhaltlichen Klärung und andererseits auch zur Versachlichung des Diskussionsstils beitragen kann.

Literatur

- Herrmann, F. (2010a). *Der Karlsruher Physikkurs 2. Thermodynamik. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. (2010b). *Der Karlsruher Physikkurs 4. Mechanik. Ein Lehrbuch für die Sekundarstufe II*. Hallbergmoos: Aulis.
- Herrmann, F. & Schmid, G. B. (1984). Statics in the momentum current picture. *American Journal of Physics*, 52, 146.
- Lehn, R., Bartelmann, M., Bühler, F., Großmann, S., Herzog, W., Hüfner, J. et al. (2013, Februar). *Gutachten über den Karlsruher Physikkurs*. (http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/index.html)
- Moldenhauer, H. (2012). Die Visualisierung des Kraftflusses in Stahlbaukonstruktionen. *Stahlbau*, 81, 32 – 40.
- Strunk, C. & Rincke, K. (2013, 19. April). *Zum Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft über den Karlsruher Physikkurs*. ([urn:nbn:de:bvb:355-epub-300368](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:355-epub-300368))