



Worauf bezieht sich der Wert einer physikalischen Größe?

Ein Spiel für Schüler/innen und Studierende

FRIEDERICH HERRMANN – MICHAEL POHLIG

Der Wert einer physikalischen Größe bezieht sich in den meisten Fällen auf eines der folgenden geometrischen Objekte: einen Punkt (z.B. Druck), eine Linie (z.B. elektrische Spannung), eine Fläche (z.B. elektrische Stromstärke) oder einen Raumbereich (z.B. Masse). In unseren Seminaren für Studierende des Lehramts haben wir immer wieder den Eindruck gewonnen, dass es in dieser Hinsicht Defizite gibt. Wir stellen eine Art Spiel vor, das man mit Studierenden, aber auch mit Schulklassen spielen kann, und das mit dem Thema zusammenhängt. Es ist einerseits amüsant und gleichzeitig lehrreich, sowohl für die Studierenden, als auch für uns Lehrkräfte.

1 Einleitung

Worauf bezieht sich der Wert einer physikalischen Größe? Die Frage hört sich zunächst recht harmlos an. Die Temperatur der Luft bezieht sich auf die Luft, die Masse eines Autos auf das Auto, die Federkraft auf die Feder usw. Nun kann man sich aber leicht davon überzeugen, dass nicht nur Schüler/innen, sondern auch Studierende mit dieser Zuordnung Schwierigkeiten haben, sobald man etwas genauer hinsieht. Um die dabei auftretenden Probleme soll es im Folgenden gehen. Wir denken dabei vor allem an Studierende des Lehramts, denn sie sind es,

die die eventuellen Unstimmigkeiten an ihre zukünftigen Schüler/innen weitergeben. Zuerst wird nun das Spiel vorgestellt, bevor wir genauer darauf eingehen, was man daraus über Physik lernen kann und wo die Ursachen mancher Überraschung liegen.

2 Das Spiel

In unserem Hauptseminar für Lehramtsstudierende machen wir in einer der ersten Sitzungen etwas, das wir im Folgenden als

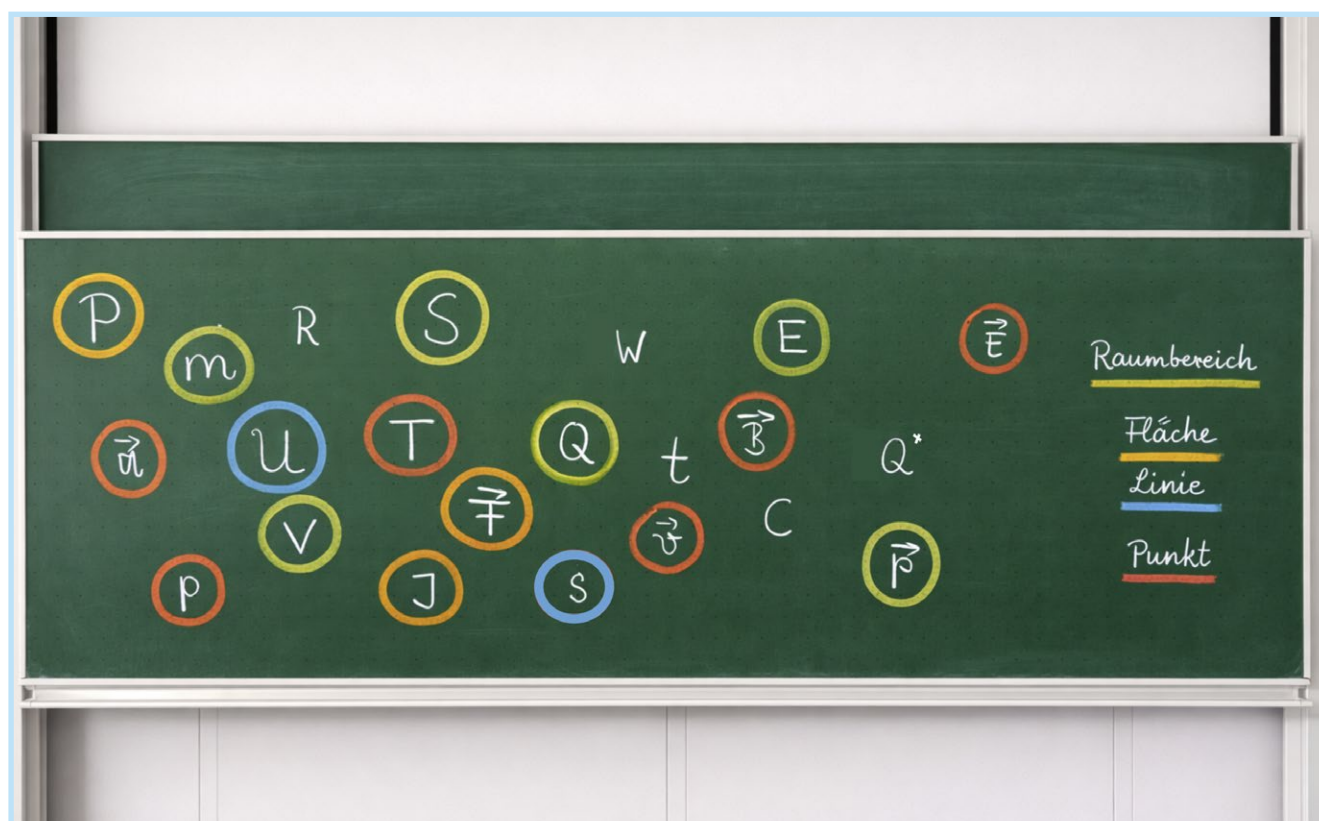


Abb. 1. Die Größensymbole werden entsprechend ihrer Zuordnung zu Punkt, Linie, Fläche oder Raumbereich farbig gekennzeichnet. (Q steht für elektrische Ladung, Q^* für Wärme.)

Spiel bezeichnen wollen. Es sollte sich auch für den Physikunterricht in der Schule eignen, und zwar sowohl für die Ober- als auch für die Mittelstufe.

Der Ablauf ist so: Wir wollen zunächst einfach möglichst viele physikalische Größen sammeln. Einer nach dem anderen der Studierenden nennt eine beliebige physikalische Größe. Das Symbol der Größe wird an die Tafel geschrieben. Es ist eine Art Wettstreit. Zunächst läuft es glatt, aber langsam gehen den Studierenden die Ideen aus. Vielleicht hilft dann ein kleiner Hinweis: „*Sie haben noch gar nichts dabei aus der Wärmelehre...*“

Macht man das Spiel mit Studierenden an der Uni, so hat man am Ende etwa 20 bis 30 Größensymbole an der Tafel stehen. In der Schule sind es vielleicht weniger.

Wir sagen nun, was wir mit den Größen vorhaben: Wie wollen sie klassifizieren. Bevor wir verraten, wonach sie klassifiziert werden sollen, lassen wir die Studierenden Vorschläge für Klassifikationen machen.

Natürlich kann man die Größen danach einteilen, in welches physikalische Teilgebiet sie gehören: Mechanik, E-Lehre ...

Ein anderer Vorschlag: Man fragt danach, ob eine Größe ein Skalar oder ein Vektor oder ein Tensor ist.

Schließlich lassen wir die Katze aus dem Sack: Wir fragen danach, auf was für ein geometrisches Gebilde sich der Wert einer Größe bezieht. Wir erarbeiten gemeinsam, dass es Größen gibt, deren Werte sich auf einen Punkt beziehen, und dass es andere gibt, die zu einer Linie oder einer Fläche oder einem Raumbereich gehören.

Wir versuchen, alle an der Tafel stehenden Größen einzuordnen und markieren sie entsprechend farbig. Bezieht sich der Wert auf einen Punkt: rot; auf eine Linie blau; auf eine Fläche orange; auf einen Raumbereich gelb. Abbildung 1 zeigt einen typischen Tafelansrieb.

Für unsere Leser/innen zeigen wir schon mal das angestrebte Ergebnis in Kasten 1. Diesem Ergebnis nahe zu kommen ist unser Ziel.

Das Interessante und Wichtige für uns Lehrkräfte ist, dass bei diesem Versuch der Einordnung Probleme auftauchen, und dass es Überraschungen gibt. Wir wollen im Folgenden einige der Probleme diskutieren.

3 Kleine und große Probleme bei der Klassifizierung – Was die Studierenden dabei lernen

3.1 Die Temperatur

Man sagt zum Beispiel, die Temperatur im Klassenraum betrage 21°C . Heißt das, dass sich ein Temperaturwert auf einen Raumbereich (hier den Klassenraum) bezieht? Natürlich nicht. Die Temperatur muss nicht an jeder Stelle im Klassenraum den gleichen Wert haben. Wenn sie überall gleich ist, kommt man mit der Angabe eines einzigen Wertes aus. Man muss dann aber dazusagen, dass die Temperaturverteilung homogen ist. Das Entsprechende gilt für den Druck, für alle möglichen Dichten (Massen-, Ladungsdichte...), für das elektrische Potenzial und andere. Auch Vektorgößen können sich auf einen Punkt

Punkt	Fläche	nicht klassifiziert
Druck p	elektr. Stromstärke I	Zeit t
Temperatur T	Flächeninhalt $\vec{A}$	elektr. Widerstand R
Ort $\vec{r}$	Leistung P (Energiestromstärke)	Kapazität C
Geschwindigkeit $\vec{v}$	Kraft $\vec{F}$ (Impulsstromstärke)	Induktivität L
Beschleunigung $\vec{a}$		Federkonstante D
elektr. Potenzial φ	Raubereich	Arbeit W
elektr. Feldstärke $\vec{E}$	Volumen V	Wärme Q^*
elektr. Flussdichte $\vec{D}$	Masse m	Tragheitsmoment J
magnet. Feldstärke $\vec{H}$	elektr. Ladung Q	Drehimpuls $\vec{L}$
magnet. Flussdichte $\vec{B}$	Impuls $\vec{p}$	Drehmoment $\vec{M}$
Massendichte ρ_m	Entropie S	
elektr. Ladungsdichte ρ_Q	Energie E	
spezifische Wärme c	Stoffmenge n_i	
Linie		
Weglänge s		
elektr. Spannung U		

Kasten 1. Die meisten physikalischen Größen beziehen sich auf einen Punkt, eine Linie, eine Fläche oder einen Raumbereich.

beziehen, etwa die elektrische und die magnetische Feldstärke oder die elektrische Stromdichte.

3.2 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Wir mussten in allen unseren Sitzungen eine Weile diskutieren, bis den Studierenden klar wurde, dass sich auch Geschwindigkeit und Beschleunigung auf einen Punkt beziehen. Aber bezieht sich denn die Geschwindigkeit eines Autos nicht auf das ganze Auto? Sie würde es, wenn sich alle Teile des Autos mit derselben Geschwindigkeit bewegten, wenn also die Geschwindigkeitsverteilung homogen wäre. Das ist sie aber nicht, denn Räder, Motorkolben, Pleuelstangen, Antriebswellen, Ventile bewegen sich relativ zu Rahmen und Karosserie.

3.3 Masse und elektrische Ladung

Man könnte denken, es sei eine Selbstverständlichkeit, dass Masse und Ladung einem Raumbereich zuzuordnen sind, da es extensive Größen sind. Es wurde aber fast jedes Mal vorgeschlagen, dass sie sich auf einen Punkt beziehen. Die Ursache für diese Einschätzung ist, dass an der Uni die so genannte Punktmechanik im Vordergrund steht und dass in der Elektrodynamik, und auch in der Quantenmechanik von Punktladungen die Rede ist.

3.4 Die elektrische Stromstärke

Man spricht von der Stärke des Stroms, der durch einen Draht, einen Widerstand oder eine Batterie fließt. Wie ist die Stromstärke zu klassifizieren? Mit etwas Hilfe kommt man zu dem Schluss, dass sich der Wert auf eine Fläche bezieht.

Wir stellen an dieser Stelle auch immer die Frage: Woran erkennt man, ob eine Stromstärke einen positiven oder einen negativen Wert hat? Das Amperemeter zeigt zwei Ampere an. Sind das plus oder minus zwei Ampere? Wir schließen, dass die Fläche, auf die sich der Wert der Stromstärke bezieht, eine Orientierung haben muss. Wenn man einfach vom Strom in einem Draht spricht, so setzt man erstens voraus, dass die Stromstärke durch jede Schnittfläche durch den Draht denselben Wert hat, und zweitens, dass man sich für das Vorzeichen nicht interessiert.

3.5 Die Energie

Es zeigte sich, dass die Studierenden die Energie zwar als eine bilanzierbare, also eigentlich extensive Größe verstehen. Trotzdem gab es aber Zweifel, ob ein Energiewert einem Raumbereich zuzuordnen ist. So hatten die Studierenden das Problem, die potenzielle Energie zu lokalisieren, d.h. das System oder den Raumbereich zu nennen, dem ihr Wert zuzuordnen ist. Konkret etwa: Man hebt eine 10 kg schwere Kiste einen halben Meter hoch. Man führt also der Kiste Energie zu. Wo steckt diese Energie? Oder: Man zieht zwei Kondensatorplatten auseinander. Dazu braucht man Energie: Wo bleibt diese Energie? Die Antwort, die man bekommt ist oft: in der Kiste, bzw. in den Kondensatorplatten. Die richtige Antwort lautet aber: im Gravitationsfeld bzw. im elektrischen Feld (HERRMANN & POHLIG, 2024).

Noch ratloser sind viele Studierende, wenn es um die Frage geht, wem die Werte der Größen Arbeit oder Wärme zuzuordnen sind. Es ist ihnen nicht klar, dass es sich hier gar nicht um

physikalische Größen im üblichen Sinn handelt, sondern um so genannte Differentialformen. Wir kommen in Abschnitt 4 noch einmal darauf zu sprechen.

3.6 Die Leistung

Die Studierenden neigten dazu, sie einem Gerät zuzuordnen – was der Gebrauch des Wortes Leistung in der Alltagssprache auch nahelegt –, aber es fiel schwer, zu entscheiden, ob sie sich auf eines unserer geometrischen Gebilde bezieht. Es ist den meisten nicht klar, dass P nichts anderes ist als die Stärke eines Energiestroms. Als Stromstärke bezieht sich ihr Wert daher auf eine orientierte Fläche.

3.7 Die Entropie

Hier herrschte gewöhnlich Ratlosigkeit, da man keine klare Vorstellung davon hatte, für welche Eigenschaft die Entropie ein Maß ist. Es gab Äußerungen, die Entropie habe keine Maßeinheit, weil sie „eine Wahrscheinlichkeit ausdrückt“ und Wahrscheinlichkeit eine reine Zahl ohne Einheit ist. Tatsächlich ist die Entropie eine sehr gutmütige extensive Größe und ihr Wert bezieht sich auf einen Raumbereich (HERRMANN & POHLIG, 2025).

3.8 Die Kraft

Nun zu der Größe, die uns ursprünglich dazu gebracht hatte, das Spiel zu erfinden.

Was die Zuordnung zu einem geometrischen Bezugsgebilde betrifft, so kamen die verschiedensten Vorschläge und Argumente.

- Ein Körper fällt zur Erde, weil die Erde auf den Körper eine Kraft ausübt. Die Kraft bezieht sich auf den Körper, also auf einen Raumbereich.
- Die Kraft wird von der Erde auf den Körper ausgeübt, also gehört sie zu zwei Körpern. Man sagt ja auch, sie beschreibe eine Wechselwirkung, und zu einer Wechselwirkung gehören immer zwei Partner. Man spricht auch von der Kraft, die zwischen zwei Punktladungen wirkt.
- Die Kraft wirkt auf einen Punkt, den Schwerpunkt. Ihr Wert bezieht sich also auf einen Punkt.
- Die elektrische Feldstärke ist definiert durch die Kraft, die auf eine Probeladung wirkt. Die Feldstärke ist eine punktbezogene Größe, also muss sich auch die Kraft auf einen Punkt beziehen. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem Kraftfeld.
- Zu einer Kraft gehört ein Angriffspunkt und eine Wirkungslinie. Also bezieht sich ihr Wert auf einen Punkt und eine Linie.
- Noch ein Standpunkt, der aber von den Studierenden nie vorgebracht wurde: Der Wert einer Kraft bezieht sich auf eine Fläche.

Man sieht, dass die Aussagen nicht übereinstimmen; dass sie teilweise im Widerspruch zueinander stehen. Offenbar ist der Gebrauch der Bezeichnung Kraft nicht einheitlich. Man kann fast sagen, es gebe unterschiedliche Kraftbegriffe. Wir diskutieren diesen Sachverhalt mit den Studierenden, und schlagen ihnen vor, im Unterricht der Schule Kräfte immer in Bezug auf eine Fläche zu definieren. Zur Begründung dieser Wahl, betrachten wir eine einfache Situation. Ein waagrecht Stab (oder Balken) steht in Längsrichtung unter Druck (Abb. 2).

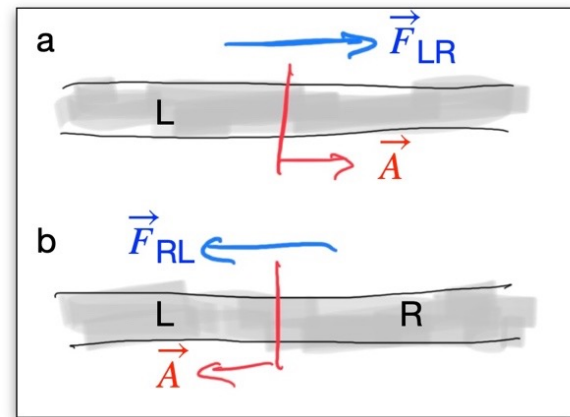


Abb. 2. Ein Stab, der in Längsrichtung unter Druckspannung steht. (a) L übt auf R eine Kraft aus, der Kraftvektor weist nach rechts. (b) R übt auf L eine Kraft aus, der Kraftvektor weist nach links.

Wir legen in Gedanken eine Schnittfläche durch den Stab, und nennen den linken Teil L und den rechten R. Wir können nun sagen, dass L auf R eine Kraft ausübt. Da wir die Möglichkeit einer Fernwirkung ausschließen wollen, können wir schließen, dass die Kraft von L auf R der Stelle zuzuordnen ist, an der der linke Teil L des Stabes den rechten Teil R berührt, oder eben einfach: die Kraft bezieht sich auf die Schnittfläche. Und wie steht es mit der anderen Kraft, d.h. mit der Kraft, die R auf L ausübt? Auch sie bezieht sich auf diese Schnittfläche. Nun wissen wir, dass

$$\vec{F}_{LR} = -\vec{F}_{RL} \quad (1)$$

gilt. Die Gleichheit, sagt man, sei Ausdruck des dritten Newtonschen Gesetzes. Man kann denselben Sachverhalt aber auch anders ausdrücken. Eine Fläche hat in der Physik immer eine Orientierung. Wir können sie als Vektor beschreiben. Dabei können wir die Orientierung beliebig wählen. Wir haben es daher gar nicht mit zwei verschiedenen Kräften zu tun. Wir haben nur die Kraft auf zwei unterschiedlich orientierte Flächen bezogen.

Das erinnert uns an die Frage, welchem geometrischen Gebilde die elektrische Stromstärke zuzuordnen ist. Auch hier war das Vorzeichen der Stromstärke von der Wahl der Orientierung der Bezugsfläche abhängig. Diese Übereinstimmung ist nicht verwunderlich, wenn man eine Kraft als Stärke eines Impulsstroms versteht (THORNE & BLANDFORD, 2017, S. 24). Es muss also auch das Vorzeichen der Kraftkomponente von dieser Wahl abhängen.

3.9 Die Zeit

Die Zeit lässt sich anscheinend nicht in unsere Kategorien einordnen. Ihrer Natur nach ist sie von ähnlicher Art wie der Ort (die Position), der ganz klar zu einem Punkt gehört. Man sieht, dass man, um sie unterzubringen, unsere Überlegungen vom Raum auf die Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie erweitern müsste. Das wollen wir aber hier nicht tun.

3.10 Die elektrische Spannung

Eine weitere Größe, die wir noch nicht unterbringen konnten, ist die elektrische Spannung. Man spricht gewöhnlich von der Spannung zwischen zwei Punkten. Das kann man aber nur, solange man es mit elektrischen Potenzialfeldern zu tun hat. Dann ist nämlich das Linienintegral zwischen Anfangs- und Endpunkt unabhängig vom Verlauf des Integrationsweges. Mit den Studierenden an der Uni definiert man die Spannung also als Linienintegral. Ihr Wert bezieht sich auf eine Linie.

3.11 Widerstand, Kapazität, Federkonstante etc.

Es bleiben noch eine Reihe weiterer Größen an der Tafel stehen, die wir noch nicht farbig markiert haben. Wir könnten für sie eine neue Klasse einführen. Oder wir können sie einfach aus unserer Liste rauswerfen. Sie sind nicht das, was man physikalische Standardgrößen nennt. Sie beziehen sich nicht auf eines unserer geometrischen Gebilde, sondern auf ein Gerät. Es sind etwa der elektrische Widerstand, die Kapazität, die Induktivität, die Federkonstante. Dabei wird vorausgesetzt, dass man das Gerät oder Bauteil korrekt anschließt bzw. einbaut. Ein Bauelement Widerstand hat den aufgedruckten Wert für den Widerstand R von $200\ \Omega$ nur dann, wenn man ihn zwischen seinen Anschlüssen, und nicht etwa quer dazu misst.

3.12 Weitere Größen

Es bleiben nun immer noch einige Größen an der Tafel, die wir nicht eingeordnet haben.

Es sind zum einen die eher geometrischen oder kinematischen Größen Winkel und Winkelgeschwindigkeit, und zum anderen die Größen, die mit einem „Moment“ zu tun haben, also Trägheitsmoment, Drehimpuls (manchmal Impulsmoment genannt), Drehmoment und Dipolmoment.

Auch sie sind unter unserem Gesichtspunkt interessant und es eröffnen sich eine Reihe von Fragen, die über unser Anliegen in diesem Artikel hinausgehen.

Außerdem gibt es noch unzählige Größen, die Materialeigenschaften beschreiben, die sich alle auf einen Punkt beziehen, wie etwa die skalare Brechzahl, die elektrische Leitfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, der vektorielle pyroelektrische Koeffizient, der Elastizitätstensor (vierter Stufe), und viele, viele andere. Diese werden aber von den Studierenden gewöhnlich nicht genannt.

4 Was die Lehrkräfte daraus lernen können

Unser Spiel macht Spaß, denn es ist ein Wettbewerb: Wem fällt noch eine weitere physikalische Größe ein? Wer macht die korrekte Zuordnung zu Punkt, Linie, Fläche oder Raumbereich? Außerdem füllt man bei den Studierenden einige Wissenslücken. Das rechtfertigt bereits, dass man eine Stunde dafür opfert.

Man kann es aber auch anders sehen: Wir können das Spiel auffassen als eine Art Diagnose. Diagnose wovon? Von einigen historisch tradierten Missständen. Wir wollen diese kurz ansprechen.

4.1 Nützliche Analogien

Die physikalischen Größen, deren Werte sich auf einen Raumbereich beziehen, sind für die mathematische Beschreibung physikalischer Vorgänge besonders wichtig. Man hat ihnen die verschiedensten Namen gegeben, die aber alle im Wesentlichen dasselbe ausdrücken: Quantitätsgrößen, extensive oder mengenartige Größen, oder im Englischen auch „fluid-like quantities“. Man kann sie auch dadurch charakterisieren, dass man sagt, sie seien bilanzierbar. Die Eigenschaft mengenartig oder bilanzierbar zu sein, hat zur Folge, dass der Umgang mit ihnen besonders einfach ist. Man kann so über sie sprechen wie man über einen Stoff spricht. Zu jeder gibt es eine Dichte, sowie einen Strom mit einer Stromstärke und einer Stromdichte.

Wenn sich die Studierenden, mit denen wir unser Spiel machen, dieser Tatsache bewusst gewesen wären, hätten sie all diese Größen aufzählen und korrekt einordnen können. Wir empfehlen, den Mengencharakter dieser Größen im Unterricht deutlich zu machen.

4.2 Kontinuumsmechanik versus Punktmechanik

Die Punktmechanik ist für die theoretische Physik wichtig. Wir empfehlen aber, sich in der Schule nicht an der Punktmechanik zu orientieren, da sie mehrere Unstimmigkeiten zur Folge hat, mit denen wir uns im Unterricht nicht auseinandersetzen möchten.

So können wir, wenn wir von Punktmassen sprechen, keine Massendichte mehr definieren. Das entsprechende gilt für die elektrische Ladungsdichte und die elektrische Stromdichte. Ein weiteres Problem entsteht, wenn man von der Kraft auf eine Punktladung spricht, weil dann die Kraft zu einer punktbezogenen Größe wird. Noch schlimmer ist die Konsequenz für die Feldenergie einer Punktladung. Wenn man sie mit Hilfe der bekannten Formel für die Energiedichte des Feldes berechnet, divergiert ihr Wert.

Wenn man von Massenpunkten oder Punktladungen spricht, macht man eine mathematische Idealisierung, die zwar in manchen Zusammenhängen nützlich ist. Sie wird aber von den Studierenden oft zu ernst genommen.

Die Alternative zur Punktmechanik ist die Kontinuumsmechanik. Sie ist für die meisten Anwendungen, mit denen wir es im täglichen Leben, und auch im Physikunterricht an der Schule zu tun haben, die bessere Grundlage.

Wir Lehrkräfte sollten dabei aber immer im Hinterkopf behalten, dass beide Beschreibungsweisen, die Punktmechanik und die Kontinuumsmechanik, mathematische Abstraktionen sind. In der realen Welt gibt es weder den Massenpunkt noch das Massenkontinuum, weder die Punktladung noch das Ladungskontinuum.

4.3 Fernwirkungen

Aussagen wie „die Erde übt auf den Mond eine Kraft aus“, oder „ungleichnamig geladene Körper ziehen sich an“ stellen einen Umgang mit dem Kraftbegriff dar, der dem Wissensstand einer

Epoche entspricht, in der es den Feldbegriff noch nicht gab; als man durch Felder vermittelte Kräfte noch als Fernwirkungen beschreiben musste. Wie soll man dann aber die beiden Situationen beschreiben? Indem man die Rolle des Feldes zum Ausdruck bringt, also etwa: „Das Feld drückt Mond und Erde zueinander hin“, oder „zwei Körper mit Ladungen verschiedenen Vorzeichens werden durch das elektrische Feld zueinander hingezogen“. Oder noch einfacher: das Feld zieht an den Körpern oder es drückt auf die Körper. Man sieht dann auch, dass sich der Wert einer Kraft auf eine Fläche bezieht: Man legt zwischen Erde und Mond oder zwischen die beiden geladenen Körper irgendwohin eine (orientierte) Bezugsfläche A .

Jetzt übt das Feld links von A eine Kraft auf das Feld rechts von A aus. Es sei angemerkt, dass die Beschreibung noch einfacher wird, wenn man statt von Kräften von Impulsströmen spricht: durch das Feld fließt vom einen zum anderen Körper ein Impulsstrom.

4.4 Differentialformen

Die Probleme, die mit den Begriffen Arbeit und Wärme verbunden sind, sind uns Lehrkräften bekannt. Indem man ihnen eigene Symbole gibt, nämlich δW und δQ , oder auch einfach W und Q , suggeriert man, es handele sich um physikalische Größen. Während eine physikalische Größe für ein gegebenes System in einem bestimmten Zustand einen bestimmten Wert hat, trifft das für die Differentialformen Arbeit und Wärme nicht zu. Auch die Tatsache, dass man sie als Prozessgrößen bezeichnet, lässt die Erwartung aufkommen, dass die beiden Größen bestimmte Werte haben. Nun lässt sich das Problem aber leicht aus der Welt schaffen: Man führt die Begriffe gar nicht erst ein. Man wird dann, vielleicht mit Überraschung, entdecken, dass einem dadurch nichts fehlt (HERRMANN et al., 2023)

5 Schlussbemerkung

Wir haben das Spiel mit unseren Studierenden des Lehramts oft gemacht. Die Studierenden lernen einiges, was ihnen bis dahin entgangen war. Man kann sagen, dass Wissenslücken gefüllt werden. Es ist auch deshalb sehr nützlich, weil man in kurzer Zeit einen Spaziergang quer durch die Physik macht. Und schließlich gibt es auch uns Lehrkräften Anlass, über einige wichtige Unterrichtsthemen nachzudenken.

Literatur

HERRMANN, F., HAAS, K., LAUKENMANN, M., MINGIRULLI, L., MORAWIETZ, P. & SCHMÄLZLE, P. (2023). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I*. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000154347>.

HERRMANN, F. & POHLIG, M. (2024). *Wo steckt die potenzielle Energie?*. *MNU Journal*, 77(3), 242–249.

HERRMANN, F. & POHLIG, M. (2025). *Die linke und die rechte Seite der Gleichung $\Delta S = Q/T$* . *MNU Journal*, 78(2), 155–159.

THORNE, K. S. & BLANDFORD, R. D. (2017). *Modern Classical Physics*. Princeton University Press.

Prof. Dr. FRIEDRICH HERRMANN, f.herrmann@kit.edu, ist jetzt im Ruhestand. Er hat am KIT Student/inn/en der Physik und des Lehramts Physik ausgebildet und war gleichzeitig Physiklehrer am Europagymnasium in Wörth am Rhein.

StD a.D. MICHAEL POHLIG, pohlig@kit.edu, war Physik-, Mathematik- und Informatiklehrer am Wilhelm-Hausenstein-Gymnasium in Durlersheim. Seit 2007 hat er am KIT einen Lehrauftrag im Bereich „Didaktik der Physik“. ■