Didaktik der Physik
Frühjahrstagung Regensburg 2007

Was ist ein Bezugssystem?

Friedrich Herrmann
Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe

Kurzfassung
Die Wahl eines Bezugssystems ist nichts anderes als die Festlegung des Nullpunkts der Werteskala einer physikalischen Größe. Je nach Bezugssystem hat die Größe in einem gegebenen Zustand unterschiedliche Werte. So gesehen kann man den Begriff „Bezugssystem" nicht nur auf die kinematischen Größen Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung anwenden, sondern auch auf viele andere Größen, wie etwa das elektrische Potenzial, die Temperatur, den Druck, den Impuls oder die Datenmenge. Die Festlegung eines Bezugssystems ist oft mit der Brechung einer durch die Natur gegebenen Symmetrie verbunden. Das bedeutet, dass durch die mathematische Beschreibung einer Erscheinung eine Komplikation eingeführt wird, die der Erscheinung selbst gar nicht innewohnt. Je nach Bezugssystem wird ein und dasselbe Phänomen unterschiedlich erklärt. Was folgt daraus für den Unterricht?

1. Was ist ein Bezugssystem?

Die Bezeichnung wird oft im folgenden Sinn gebraucht: Wenn man die Bewegung eines Körpers K beschreibt, muss man vorher das „Bezugssystem" festlegen. Man muss sagen, in Bezug auf welchen Vergleichskörper man Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung usw. angibt. Man kann den Wert dieser Größen nicht angeben, solange nicht ein Bezugskörper benannt ist. Da man den Bezugskörper aber nur braucht, um die Werte der kinematischen Größen von K festzulegen und es einem auf die sonstigen Eigenschaften des Bezugskörpers nicht ankommt, ersetzt man diesen in Gedanken durch ein Achsenkreuz oder Dreibein.

Man kann sich auch den ganzen Raum durch ein Liniennetz mit Linien x = const usw. überzogen denken. Die Bewegung des betrachteten Körpers geschieht dann durch dieses Koordinatengitter hindurch. Ja, es ist fast so, als ob sich der Körper K durch ein Medium hindurchbewegt, einen Äther oder den absoluten Raum – nur dass dieser absolute Raum eben nicht absolut ist, sondern auf einer Festlegung beruht.

Wenn man von einem Bezugssystem schlechthin spricht, so meint man allerdings gewöhnlich nur, dass es einem darauf ankommt, welche Geschwindigkeit K in Bezug auf das Bezugssystem hat, man interessiert sich nicht für seine Position. Wir sehen daran, dass die Idee des Dreibeins die Sache eigentlich gar nicht trifft. Die Festlegung des Bezugssystems entspricht einfach der Festlegung des Nullpunkts auf der Geschwindigkeitsskala oder im Geschwindigkeitsraum. Je nachdem, wie man den Nullpunkt der Geschwindigkeit wählt, bekommt man für denselben Vorgang einen anderen Geschwindigkeitswert.

Wenn man es so beschreibt, fällt einem auf, dass das Verfahren dasselbe ist, das man auch bei anderen physikalischen Größen anwendet: Man legt den Nullpunkt der entsprechenden Skala fest. In manchen Fällen legt die Natur einen Nullpunkt nahe. Es gibt also einen natürlichen Nullpunkt. In diesem Fall ist es ungeschickt, einen anderen zu wählen. Manchmal hat man dann sogar das Gefühl, man hätte gar keine Wahl. Nehmen wir zum Beispiel die Masse. Niemand käme auf die Idee, das was wir normalerweise 1 kg nennen, zum Nullpunkt zu erklären. Beim Impuls ist das schon anders. Und besonders bekannt ist die Frage natürlich bei den intensiven Größen: Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, elektrisches Potenzial, chemisches Potenzial.

Wir wollen also im Folgenden das Problem „Bezugssystem" in einem etwas allgemeinerem Zusammenhang sehen: Ein und dieselbe physikalische Größe kann zu einem bestimmten Zeitpunkt am selben System unterschiedliche Werte haben, und zwar nicht etwa, weil man verschiedene Maßeinheiten wählt, sondern durch irgendeine andere vernünftige Operation. In anderen Worten: Einer sagt, der Wert der Größe betrage 5 Einheiten, der andere sagt 8 Einheiten – wohlgemerkt dieselben Einheiten –, und beide haben Recht. Wir werden dann sagen, die Größe sei in verschiedenen Bezugssystemen gemessen worden. Wir betrachten einige einfache Beispiele.

Man wählt als Nullpunkt der Temperatur manchmal die Temperatur des schmelzenden Eises, manchmal den absoluten Nullpunkt. Hier zeichnet die Natur einen Wert aus, den absoluten Nullpunkt. Viele Vorgänge werden in ihrer Beschreibung einfacher, wenn man statt der Celsius-Skala die Kelvin-Skala wählt. Welche Skala man gewählt hat, bringt man im Namen der Maßeinheit zum Ausdruck: Grad Celsius oder Kelvin.

Ähnlich ist es beim Druck. Die Natur zeichnet einen Druckwert aus, nämlich den, den wir gewöhnlich als 0 bar bezeichnen. Aber auch hier wird manchmal ein anderer Nullpunkt gewählt. Wieder bringt man das im Namen der Maßeinheit zum Ausdruck, bar oder Atü.

Beim elektrischen Potenzial zeichnet die Natur keinen Wert aus, wenigestens nicht auf irgendeine fundamentale Weise. Praktisch ist es aber, die Erde als Referenzkörper zu wählen, und festzulegen, dass das Potenzial der Erde 0 Volt ist. Hier ist es nicht üblich, den Namen der Maßeinheit zu wechseln, wenn man den Nullpunkt wechselt.

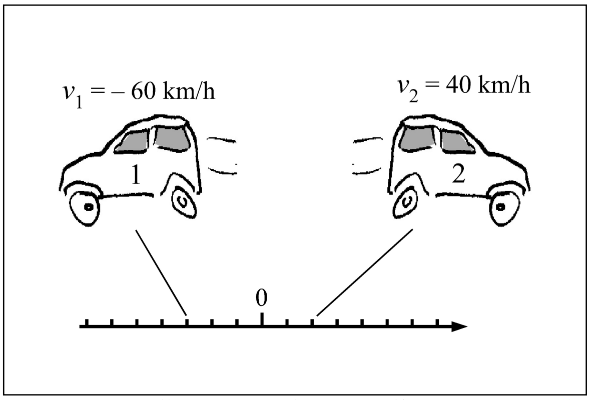

Abb. 1. Das linke Auto ist schneller, hat aber die niedrigere Geschwindigkeit.

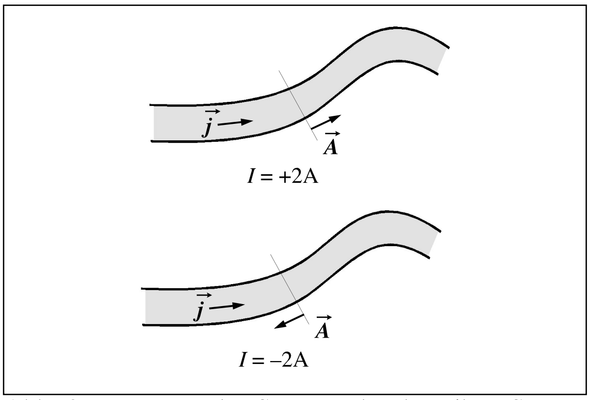

Abb. 2. Der Wert der Stromstärke desselben Stroms ist postitiv oder negativ, je nach Orientierung der Bezugsfläche.

Bei der Geschwindigkeit gibt es auch wieder durch die Natur ausgezeichnete Werte: etwa die Geschwindigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung. Dieser Nullpunkt ist allerdings für den terrestrischen Gebrauch ungeeignet. Daher legt man hier, meist ohne es zu betonen, die Geschwindigkeit der Erdoberfläche als 0 m/s fest. Es gibt noch einen anderen von der Natur ausgezeichnetem Geschwindigkeitswert, nämlich die Geschwindigkeit des Lichts. Diese ist aber als Nullpunkt nicht zu gebrauchen.

2. Symmetriebrechung

Die Wahl eines Bezugssystems stellt oft, aber nicht immer eine Brechung einer in der Natur vorliegenden Symmetrie dar: Ein Punkt wird ausgezeichnet und die Orientierung einer Achse. Wenn die Größe eine Vektorgröße ist, zeichnet man auch Richtungen im Raum aus. Das führt zu Unstimmigkeiten, die uns im Unterricht die größten Probleme bescheren.

Hier ein Beispiel: Zwei Fahrzeuge, Fahrzeug 1 fährt mit 40 km/h nach rechts, Fahrzeug 2 mit 60 km/h nach links, Abb. 1. Welches hat die höhere Geschwindigkeit? Es ist v_1 = – 60 km/h, und v_2 = 40 km/h. Es ist also $v_2 > v_1$. Obwohl Fahrzeug 2 schneller ist, ist seine Geschwindigkeit kleiner. Das bekommt man im Unterricht natürlich in den Griff, aber mit welchem Aufwand! Die Umgangssprache steht uns dabei im Weg. Und wenn man einem Physiker gut zuhört, stellt man fest, dass er ganz unbekümmert zwischen den beiden Sprachen hin- und herspringt. Oft wird also nicht die Sprache der Mathematik benutzt, sondern die der Symmetrie des Phänomens nähere Umgangssprache.

In einigen Bereichen der Physik kommt man über die Umgangssprache gar nicht hinaus. Elektrische Spannungen und Stromstärken zum Beispiel sind bei den Physikern immer positiv, d.h. man operiert nur mit den Beträgen. Den Studenten ist gewöhnlich gar nicht klar, was es überhaupt bedeutet, eine Stromstärke betrage –2A. Hier wird also gar kein Bezugssystem festgelegt. Dazu würde gehören, dass man vor Beginn der Beschreibung eine Richtung im Stromkreis ausgezeichnet. Es sei kurz daran erinnert, wie man eine Stromstärke vorzeichenrichtig beschreibt, Abb. 2. Für die elektrische Stromstärke I gilt

$$I = \vec{j} \cdot \vec{A}.$$

Die Stromstärke ist also das Skalarprodukt aus Stromdichte $\vec{j}$ und Flächeninhalt $\vec{A}$. Ob I positiv oder negativ ist, hängt davon ab, ob die beiden Vektoren dieselbe oder entgegengesetzte Richtung haben. Die Richtung der Stromdichte (die „Stromrichtung“) liegt eindeutig fest. Wie steht es aber mit der Fläche? Die können wir orientieren wie wir wollen. Das bedeutet, dass man das Vorzeichen der Stromstärke erst angeben kann, nachdem man eine Festlegung über die Richtung der Bezugsfläche getroffen hat, nachdem man also das Bezugssystem festgelegt hat. Für Elektrotechniker ist das eine Selbstverständlichkeit, aber welcher Physiker macht das schon? Einer entsprechende Operation bedarf es, um eine Spannung vorzeichenrichtig anzugeben.

Das Ohmsche Gesetz schreiben wir Physiker einfach so: $U = R \cdot I$, und es werden nur die Beträge der Größen eingesetzt. Über die Vorzeichen verlieren wir kein Wort. Merkwürdigerweise wird aber beim Induktionsgesetz lang und breit diskutiert, woher das Minuszeichen kommt. Ein nicht vorhandenes Vorzeichen ist aber ein Pluszeichen, und ein Pluszeichen ist genauso wichtig wie ein Minuszeichen.

Dasselbe Problem haben wir bei der Kraft (beim Impulsstrom). Auch ihr Vorzeichen liegt erst fest, wenn man eine orientierte Fläche angegeben hat, auf die sich ihr Wert beziehen soll. Auch hier sind es übrigens die Physiker, die hudeln. Die Ingenieure könnten sich eine solche Nachlässigkeit nicht leisten. Wieder bedeutet aber das Orientieren der Bezugsfläche, dass man eine dem Phänomen innewohnende Symmetrie zerstört.

Wenn nun die Definition eines Nullpunktes oder das Orientieren einer Achse die Symmetrie zerstört, warum machen wir es dann überhaupt? Weil es nicht anders geht. Nur so bekommen wir die Erscheinungen mathematisch in den Griff. Eine Mathematik, die die natürliche Symmetrie berücksichtig, kennen wir nicht. Vielleicht wäre sie möglich, aber sie wäre gewiss kompliziert und unästhetisch.

3. Phänomene in verschiedenen Bezugssystemen

Bezugssytemwechsel führen dazu, dass ein und dasselbe Phänomen unterschiedlich gedeutet wird. Auch hieran erkennt man, dass man durch die physikalische Beschreibung eine Symmetrie bricht. Denn das Phänomen selbst behält natürlich seine Identität. Der scheinbare Unterschied resultiert nur aus der mathematisch-physikalischen Deutung. Hier einige, zum Teil sehr einfache Beispiele:

1. Europäer und Australier

A. Die Europäer stehen aufrecht, die Australier hängen mit dem Kopf nach unten an der Erde.
B. Die Australier stehen aufrecht, die Europäer hängen mit dem Kopf nach unten an der Erde.

2. Floß auf dem Rhein

A. Ich stehe in Karlsruhe am Rhein. (D.h. das Bezugssystem ist fest mit dem Rheinufer verbunden.) Das Wasser bewegt sich in Richtung Mannheim.
B. Ich stehe auf einem Floß. Das Wasser ruht Mannheim bewegt sich auf mich zu.

3. Auto fährt um die Kurve

A. Ich sitze im Auto. Ich werde in der Kurve gegen die Tür gedrückt.
B. Ich stehe daneben: Die Personen im Auto haben die Tendenz, geradeaus weiter zu fliegen.

4. Radfahrer

A. Ich bin der Radfahrer. Die Pedale machen eine Kreisbewegung.
B. Der Radfahrer ist jemand anders. Ich stehe am Straßenrand. Die Pedale beschreiben eine Zykloide.

5. Noch einmal der Radfahrer

Wir fragen nach dem Energiefluss von vorn, aus den Muskeln des Radfahrers, nach hinten zum Hinterrad.
A. Ich bin der Radfahrer. Die Energie, die aus meinen Muskeln kommt, fließt durch die Kette zum Hinterrad. Es ist

$$P = v \cdot F,$$

wo v die Geschwindigkeit im Bezugssystem Fahrrad ist, und F die Kraft, die das vordere Kettenrad mit Hilfe der Kette auf das hintere ausübt.
B. Ich stehe am Straßenrand. Wir wenden dieselbe Formel auf die Kette an. Die Kraft ist dieselbe wie vorher, nur die Geschwindigkeit der Kette ist jetzt größer. Durch die Kette fließt mehr Energie zum Hinterrad, als die Muskeln des Radfahrers liefern. Und auch mehr, als hinten abgenommen wird. Wie ist das zu erklären? Ein Teil der Energie fließt durch den Fahrradrahmen wieder nach vorn. Dieser steht nämlich unter Druckspannung, es wirkt also eine Kraft, (vom demselben Betrag wie die in der Kette), und der Rahmen bewegt sich. Die Formel sagt uns, dass genau die Energie, die in der Kette zu viel fließt, durch den Rahmen wieder zurückfließt.

6. Bewegter Kondensator

Wir betrachten einen geladenen Kondensator, und fragen nach Energieströmungen.

A. Der Kondensator ruht. Im seinem elektrischen Feld steckt Energie, aber diese bleibt wo sie ist, wir haben keinen Energiestrom.
B. Der Kondensator bewegt sich nach rechts. Jetzt muss auch die Energie zwischen den Platten nach rechts transportiert werden, es muss ein Energiestrom fließen. Dass wir einen Energiestrom haben, sieht man dem elektromagnetischen Feld an. Die Ladung (auf den Platten) ist in Bewegung; sie erzeugt ein magnetisches Feld. Dieses Feld ist im Wesentlichen auf den Raum zwischen den Platten beschränkt: Es ist homogen, und die Feldstärkevektoren stehen senkrecht zu denen des elektrischen Feldes. Der Energiefluss ist gleich dem Kreuzprodukt aus elektrischer und magnetischer Feldstärke. Das Ergebnis der Rechnung ist allerdings zunächst überraschend: Es fließt im Feld doppelt so viel Energie nach rechts, wie wir brauchen, um die Energie von links nach rechts zu transportieren. Die Erklärung? Die Kondensatorplatten stehen unter Zugspannung, es wirkt eine Kraft. Außerdem bewegen sie sich. Mit der Formel

$$P = v \cdot F$$

folgt, dass in den Kondensatorplatten ein Energiestrom nach links fließt. Also: Die Hälfte des Energiestroms im Feld fließt durch die Kondensatorplatten wieder zurück nach links [1].

Wir sehen auch hier, dass ein und dasselbe System in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedlich beschrieben wird.

7. Geladene Kugel und Magnet

Eine geladene Kugel bewegt sich zwischen den Polen eines Dauermagneten, Abb. 3.

A. Bezugssystem des geladenen Körpers: Die Kugel allein hätte ein radialsymmetrisches elektrisches Feld. Der bewegte Magnet allein würde ein homogenes elektrisches Feld erzeugen, Teilbild (a). Das resultierende Feld zieht die geladene Kugel nach rechts, Teilbild (b).
B. Bezugssystem des Magneten: Der Magnet allein hätte ein homogenes magnetisches Feld. Die geladene Kugel allein würde ein zylindersymmetrisches magnetisches Feld erzeugen, Teilbild (c). Das resultierende Feld drückt die geladene Kugel nach rechts, Teilbild (d).

Die Beschreibung in den beiden Bezugssystemen entspricht den beiden „Grundversuchen“ zur Induktion. Es handelt sich beide Male um dasselbe Phänomen, aber einmal wird es erklärt durch den Zug eines elekt-

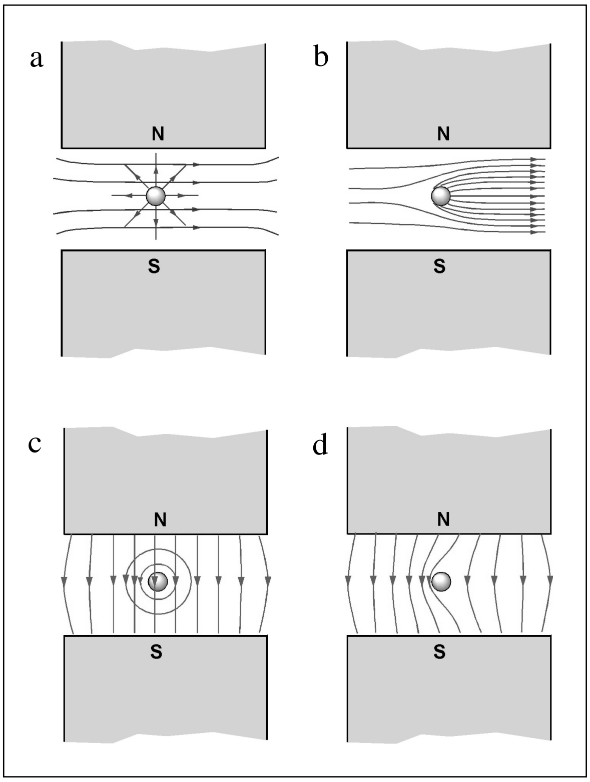

Abb. 3. (a) Die ruhende, positiv geladene Kugel erzeugt ein radiales, der in die Bildebene hinein bewegte Magnet ein homogenes elektrisches Feld. (b) Das resultierende elektrische Feld zieht die Kugel nach rechts. (c) Der ruhende Magnet erzeugt ein homogenes, die aus der Bildebene heraus bewegte Kugel ein zylindersymmetrisches magnetisches Feld. (d) Das resultierende magnetische Feld drückt die Kugel nach rechts.

rischen und einmal durch den Druck eines magnetischen Feldes. (Man kann auch sagen, es werde einmal mit Hilfe der ersten und einmal mit der zweiten Maxwellgleichung beschrieben.)

8. Fallender Körper

Der Kasten mit Männchen und Kugel befindet sich im freien Fall, Abb. 4.

A. Bezugssystem Kasten: Die Kugel ruht, denn die Gravitationsfeldstärke ist null.
B. Bezugssystem Erde: Die Kugel fällt beschleunigt, denn die Feldstärke ist von null verschieden.

Eine interessante Komplikation tritt auf, wenn die Kugel elektrisch geladen ist. Im Bezugssystem der Erde haben wir eine beschleunigte Ladung. Daher gibt die Kugel elektromagnetische Strahlung ab. Im Bezugssystem des Kastens hat sie nur ein statisches elektrisches Feld.

9. Datenmenge in einem Datenspeicher

In der Personalstelle der Universitätsverwaltung wird von jeder angestellten Person unter anderem festgehalten: 1. Geschlecht; 2. privatversichert oder nicht. Das Computerprogramm der Verwaltung ist so geschrieben, dass in einem bestimmten Speicherplatz der Festplatte eine 1 steht, falls eine bestimmte Person eine privatversicherte Frau ist. Wie groß ist die Datenmenge dieser Speicherposition? Die Datenmenge ist so definiert.

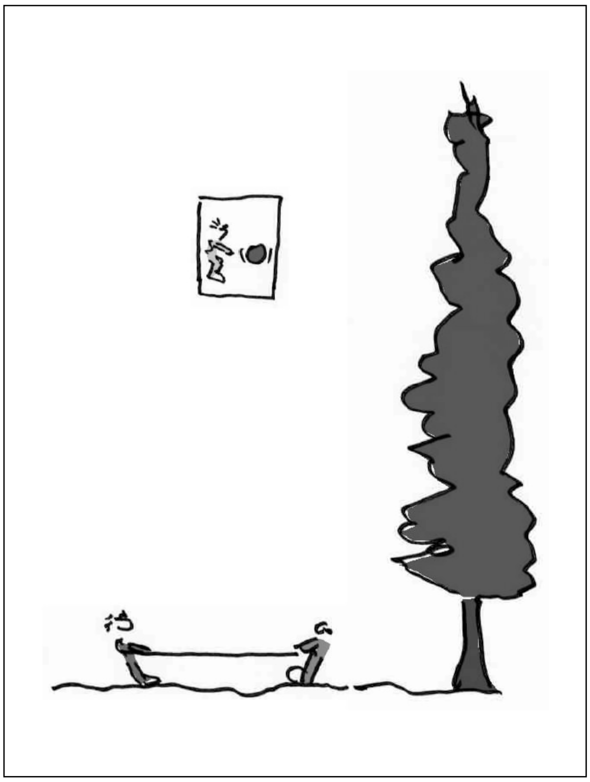

Abb. 4. Im Bezugssystem des Kastens ist die Gravitationsfeldstärke null, im Bezugssystem der Erde nicht. Ist die Kugel elektrisch geladen, so strahlt sie im Bezugssystem der Erde, in dem des Kastens strahlt sie nicht.

$$H = -\sum_i p_i \mathrm{ld} p_i \text{ bit} = p_1 \mathrm{ld} p_1 + p_2 \mathrm{ld} p_2 \text{ bit}$$

Um sie zu berechnen, müssen wir die Wahrscheinlichkeiten für den Versicherungsstatus und das Geschlecht kennen. Wenn nun jemand nur am Versicherungsstatus der Person interessiert ist, so setzt er ein

$p_1 = 0{,}1$ und $p_2 = 0{,}9$.

Denn 10 % der Angestellten sind privatversichert, 90 % gesetzlich. Man erhält

$H = 0{,}47$ bit

Ein anderer Kollege interessiert sich dagegen dafür, ob die Person ein Mann oder eine Frau ist. Da an der Uni 30 % der Beschäftigten Frauen und 70 % Männer sind, geht er aus von

$p_1 = 0{,}3$ und $p_2 = 0{,}7$.

Und er findet:

$H = 0{,}88$ bit.

Wer von beiden hat Recht? Wieder beide. Es sind Werte derselben Größe in verschiedenen Bezugssystemen. Hier haben wir den Bezugssystembegriff allerdings so weit verallgemeinert, wie es normalerweise nicht getan wird.

Man kennt das Problem auch aus einem anderen Zusammenhang. Ein Bild wird zweimal abgespeichert; einmal als Vektorbild, und einmal als Bitmap. Einmal braucht es 196 kB Speicherplatz, einmal 472 kB. Wie viel bit hat das Bild wirklich? Wieder kommt es aufs Bezugssystem an. Eimal betrachtet man es als Mitglied eines Ensembles von Objekten, die alle aus bestimmten, vorgegebenen geometrischen Objekten, wie Geraden, Polygonen, Bezierkurven etc. zusammengesetzt sind, und einmal als Mitglied des Ensembles aller Bilder, die sich aus einem Raster von so und so viel, sagen wir 500 000 Pixeln bilden lassen.

4. Gute und schlechte Bezugssysteme

Es gibt gute und schlechte Bezugssysteme. Schlecht nennen wir ein Bezugssystem, wenn die Beschreibung eines Phänomens komplizierter ist als in einem anderem, einem guten.

Manchmal ist die Erde ein passendes, praktisches, gutes Bezugssystem. So setzt man oft die Geschwindigkeit der Erde gleich null, oder ihr elektrische Potenzial. Manchmal gibt die Natur ein gutes Bezugssystem vor, etwa für die Temperatur und den Druck. Oft sind Inertialsysteme gute Bezugssysteme.

In manchen Fälen mag sogar ein rotierendes Bezugssystem das passende sein: Bei meteorologischen und geophysikalischen Phänomenen. Im Allgemeinen sind aber rotierende Bezugssysteme eher ungeeignet, denn in ihnen gilt der Impulserhaltungssatz nicht. Stellen wir uns vor, wir leben auf einer rotierenden Scheibe, Abb. 5, – es trifft ja sogar zu – und wir beschreiben die Welt in diesem Bezugssystem. Wir beobachten dann ein merkwürdiges Gravitationsfeld: Die Feldstärke nimmt vom Drehpunkt aus nach außen hin proportional zu r zu. Das Feld hat also überall Divergenzen, obwohl nichts da ist, was wir als Quellen des Feldes identifizieren könnten. Wir können auch die Impulsströmung im Feld berechnen und stellen fest, dass auch diese überall im Feld Quellen und Senken hat. In anderen Worten: der Impulserhaltungssatz ist an jeder Stelle verletzt.

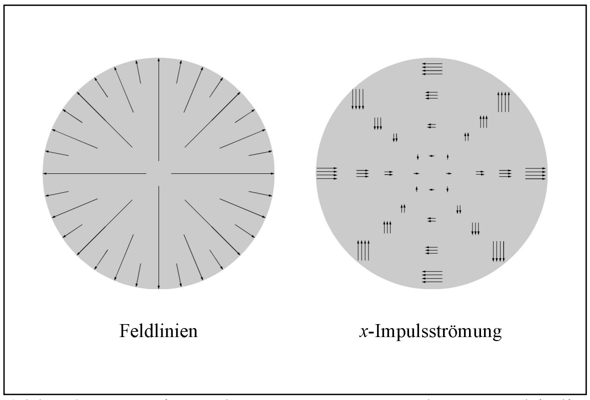

Abb. 5. Im rotierenden Bezugssystem hat sowohl die Gravitationsfeldstärke (links), als auch die Impulsströmung (rechts) überall Quellen oder Senken.

5. Schlussfolgerung

Was können wir aus all dem für unseren Unterricht lernen?

Bezugssystemwechsel sind meist ein kompliziertes Geschäft. Wenn man sich damit beschäftigt, lernt man viel Physik. Allerdings bezahlt auch dafür. Angesichts der Tatsache, dass uns die Zeit hinten und vorn nicht reicht, ist unsere Schlussfolgerung: Koche das Thema auf kleiner Flamme. Statt dessen empfehlen wir:

1. Beschreibe eine Erscheinung wenn möglich bezugssystem-unabhängig. Bei der Induktion z.B. sprechen wir nicht von der Bewegung der Magneten oder des Leiters, sondern gleich von der Relativbewegung.

2. Beschreibe die Erscheinung in dem Bezugssystem, in dem sie am einfachsten ist. Vermeide also die Beschreibung in einem rotierenden Bezugssystem.

6. Literatur

[1] HERRMANN, Friedrich (1993): The unexpected path of the energy in a moving capacitor. In: Am. J. Phys. 61, 119-121