

## Wieviel Bezugssystemwechsel verträgt der Physikunterricht?



---

FRIEDRICH HERRMANN – MICHAEL POHLIG

---

Der Begriff Bezugssystem begegnet uns im Physikunterricht an verschiedenen Stellen. Bezugssystemwechsel sind ein wichtiges Werkzeug der Physik. Wir wollen das Thema hier kritisch beleuchten.

Zum einen schlagen wir vor, Bezugssystemwechsel nicht nur im Zusammenhang mit der Mechanik zu behandeln. Zum zweiten empfehlen wir, den Begriff der Scheinkraft nicht einzuführen, und die Erscheinungen, bei denen sie auftreten, auf eine andere Art zu deuten. Schließlich plädieren wir dafür, das Thema Bezugssystemwechsel nicht zum Hauptthema der speziellen Relativitätstheorie zu machen.

## 1 Einleitung

Bezugssystemwechsel sind ein Thema des Physikunterrichts. Man behandelt es im Rahmen der Mechanik. Man zeigt, welche physikalischen Aussagen bezugssystemunabhängig sind; man führt den Begriff Inertialsystem ein; man diskutiert rotierende Bezugssysteme und führt die Zentrifugalkraft als Scheinkraft ein. Falls es zur Behandlung der speziellen Relativitätstheorie kommt, spielen Bezugssystemwechsel eine besonders wichtige Rolle – wie es der Name der Theorie auch andeutet.

Wir wollen das Thema im Folgenden etwas kritisch beleuchten. Einerseits schlagen wir vor, Bezugssystemwechsel nicht nur im Zusammenhang mit der Mechanik zu behandeln. Zum zweiten empfehlen wir, den Begriff Scheinkraft nicht einzuführen, und die Erscheinungen, bei denen Scheinkräfte auftreten, auf eine andere Art zu deuten. Schließlich empfehlen wir, das Thema Bezugssystemwechsel in der speziellen Relativitätstheorie etwas zurückzunehmen und stattdessen mit der relativistischen Dynamik zu beginnen.

In Abschnitt 2 machen wir uns zunächst Gedanken darüber, wie man den Begriff Bezugssystem möglichst allgemein definiert. In Abschnitt 3 diskutieren wir Beispiele für Bezugssystemwechsel, und zwar sowohl alt bekannte als auch einige weniger bekannte. In Abschnitt 4 schlagen wir vor, wie man mit beschleunigten Bezugssystemen umgehen kann, und zwar zuerst mit linear beschleunigten und dann mit rotierenden. In Abschnitt 5 geht es um die Rolle von Bezugssystemwechseln in der speziellen Relativitätstheorie. In Abschnitt 6 schließlich folgen einige Bemerkungen zum Unterricht in der Schule.

## 2 Wie wählt man das Bezugssystem?

Der Begriff Bezugssystem wird gewöhnlich so erklärt: Wenn man die Bewegung eines Körpers  $K$  beschreiben will, muss man vorher einen Bezugskörper benennen, d. h. einen Körper, in Bezug auf den man Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung von  $K$  angibt. Da man den Bezugskörper aber nur braucht, um die Werte der kinematischen Größen von  $K$  festzulegen, und es auf seine sonstigen Eigenschaften nicht ankommt, ersetzt man ihn in Gedanken durch ein Ortskoordinatensystem, das Bezugssystem. Ein besonders wichtiges Bezugssystem ist das so genannte Inertialsystem. Seine Definition ist in den Lehrbüchern nicht ganz einheitlich. Wir halten uns im Augenblick an die Definition, die man am häufigsten antrifft: Ein Bezugssystem ist ein Inertialsystem, wenn sich ein Körper, auf den keine Kräfte wirken, geradlinig gleichförmig bewegt. Wir kommen in Abschnitt 4.1 darauf zurück.

Man kann das Festlegen eines Bezugssystems auch anders beschreiben: Mit der Wahl des Bezugssystems legt man Nullpunkte fest, und zwar den Nullpunkt der Position (in drei Raumrichtungen), den der Geschwindigkeit, den der Beschleunigung, und die Nullpunkte aller höheren Zeitableitungen der Position; darüber hinaus auch den der Winkelgeschwindigkeit und deren Zeitableitungen.

Wenn man es so ausdrückt, sieht man, dass die Wahl eines Bezugssystems in der Mechanik ein Spezialfall einer Festlegung ist, die man auch für andere physikalische Größen treffen muss: für die Temperatur, für das elektrische Potenzial, für die elektrische Ladung etc.

Oft zeichnet die Natur einen Punkt auf der Werteskala der betrachteten Größe aus. Dann ist dieser Punkt für die Wahl als Nullpunkt besonders geeignet. Manchmal ist diese Wahl so selbstverständlich, dass man gar nicht darüber spricht, etwa bei der elektrischen Ladung, bei der Masse oder beim Volumen. Nicht ganz so selbstverständlich ist sie etwa bei der Temperatur, beim chemischen Potenzial, oder wie wir später noch sehen werden, bei der Beschleunigung.

Betrachten wir als Beispiel zunächst die elektrische Ladung. Hier existiert ein ausgezeichnete Wert. Wenn man ihn als Nullpunkt wählt, ist das COULOMBSCHE Gesetz so einfach wie wir es kennen. Niemand käme auf die Idee, ihn anders zu wählen. Was das elektrische Potenzial betrifft, so sagt man gewöhnlich, dass es keinen ausgezeichneten Nullpunkt gibt – wenigstens nicht in irgendeinem fundamentalen Sinn. Trotzdem gibt es Werte auf der Potenzialskala, die sich aus praktischen Gründen als Nullpunkte besonders eignen. In der Elektrostatik hat man es mit geladenen Körpern zu tun. Es ist hier zweckmäßig, als Potentialnullpunkt das Potential eines unendlich fernen Punktes zu wählen. In der Elektrotechnik dagegen wählt man gern das Potential der Erde als Nullpunkt und im Auto das Potential des Fahrgestells.

Auch bei der Temperatur sind verschiedene Nullpunkte in Gebrauch. Wenn man den Temperaturwert, der auf der Celsius-Skala bei  $-273^{\circ}\text{C}$  liegt, als Nullpunkt wählt, nehmen verschiedene fundamentale Beziehungen, etwa die ideale Gasgleichung, eine besonders einfache Gestalt an. Natürlich kann man die Gasgleichung auch mit der Celsius-Temperatur formulieren, aber sie sieht dann unnötig kompliziert aus.

Etwas verwickelter ist die Situation bei den Nullpunkten der mechanischen Größen. Wenn man hier einen Nullpunkt schlecht festlegt, kann es passieren, dass fundamentale physikalische Gesetze nicht mehr gelten. Die beste Wahl eines Bezugssystems für die kinematischen Größen kennen wir schon: das Inertialsystem.

Bei dieser Wahl wird kein ausgezeichnete Nullpunkt für Ort und Geschwindigkeit vorgegeben, wohl aber für die Beschleunigung und alle höheren Zeitableitungen der Position, und was Drehungen betrifft, wird kein Nullpunkt für den Winkel, wohl aber für die Winkelgeschwindigkeit vorgegeben. Bei jedem beliebigen Wechsel zwischen zwei Inertialsystemen ändern sich die Werte zahlreicher Größen: Geschwindigkeit, Impuls, kinetische Energie, Impuls- und Energiedichte, Impuls- und Energiestromdichte und andere – wie wir noch sehen werden. Das kann dazu führen, dass sich auch der Verlauf von Impuls- und Energieströmen ändert. Was sich dagegen nicht ändert – und das ist wichtig – ist die Gültigkeit der Aussagen über Erhaltung oder Nichterhaltung von Impuls, Drehimpuls, Energie, elektrischer Ladung, Entropie und Stoffmenge.

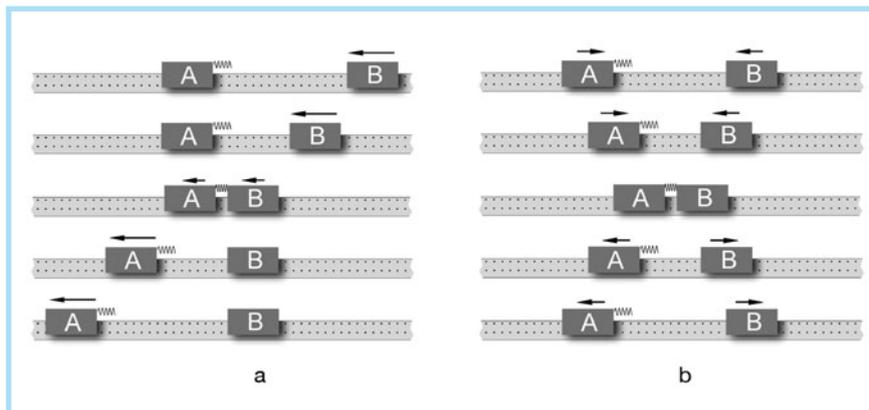


Abb. 1. Elastischer Stoß zwischen zwei Gleitern auf der Luftkissenbahn in zwei verschiedenen Bezugssystemen zu fünf verschiedenen Zeitpunkten. (a) Vor dem Stoß ruht Gleiter A; (b) vor dem Stoß haben die Gleiter entgegengesetzt gleiche Geschwindigkeiten.

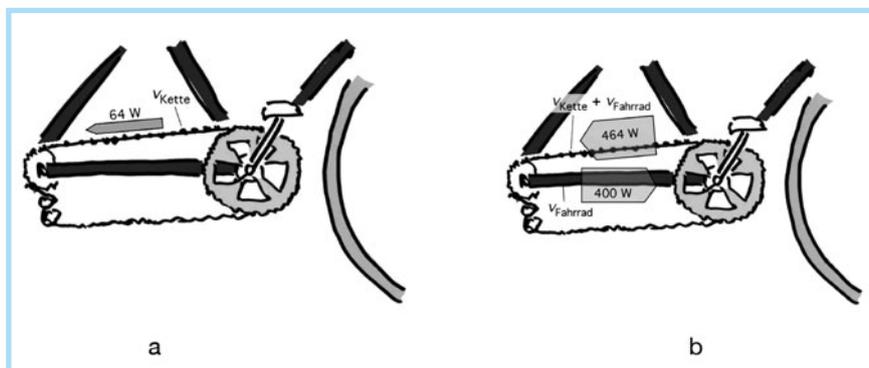


Abb. 2. Energietransport vom vorderen zum hinteren Kettenrad eines Fahrrads; (a) im Bezugssystem des Fahrrads; (b) im Bezugssystem der Erde

Wir betrachten im Folgenden einige Beispiele dafür, wie sich der Wechsel des Bezugssystems auf die Beschreibung eines Vorgangs konkret auswirkt und ziehen am Ende jedes Beispiels eine Schlussfolgerung. Diese Schlussfolgerungen sind in Kasten 1 am Ende des Beitrags noch einmal zusammengefasst.

### 3 Wechsel des Bezugssystems

Bei den folgenden vier Beispielen geht es um Vorgänge, die sich in einem kleinen Raumbereich in der Nähe der Erdoberfläche abspielen, bei denen wir also annehmen können, dass ein mit der Erde verbundenes Bezugssystem ein Inertialsystem im oben definierten Sinn ist. Damit ist auch jedes andere Bezugssystem, das sich dagegen mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, ein Inertialsystem. Wir sehen also von den Effekten ab, die durch die Rotation der Erde zustande kommen.

#### 3.1 Elastischer Stoß

Wir beginnen mit einem allgemein bekannten, fast trivialen Beispiel: dem elastischen Stoß zwischen zwei Gleitern auf der Luftkissenbahn (Abb. 1). Abbildung 1a zeigt den Ablauf in dem Bezugssystem, in welchem Körper A vor dem Stoß ruht, in Abbildung 1b bewegen sich die Körper vor dem Stoß mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit aufeinander zu. Die

Rechnungen zu Impuls- und Energiebilanz sind einfach. Sie zeigen, dass beide Bilanzen stimmen, obwohl die Werte von Energie und Impuls, die sich auf einen Körper beziehen, in den beiden Bezugssystem unterschiedlich sind.

Wir schließen: Beim Wechsel von einem Bezugssystem in ein anderes ändern sich die Werte physikalischer Größen; die physikalischen Gesetze bleiben aber gültig.

#### 3.2 Energietransport durch eine Fahrradkette

Jemand fährt mit dem Fahrrad. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt. Die Kette bewegt sich (relativ zum Fahrradrahmen) mit 0,8 m/s nach vorn, in der Kette wirkt eine Kraft (fließt ein Impulsstrom) von 80 N (Abb. 2a). Daraus folgt, dass in der Kette ein Energiestrom nach hinten fließt:

$$P = v \cdot F = 0,8 \text{ m/s} \cdot 80 \text{ N} = 64 \text{ W.}$$

Wir betrachten nun das Fahrrad „von außen“, d.h. im Bezugssystem der Erde (Abb. 2b). Es habe eine Geschwindigkeit von 18 km/h = 5 m/s. In unserem neuen Bezugssystem bewegt sich die Kette mit 5,8 m/s, und für den Energiestrom ergibt sich:

$$P = v \cdot F = 5,8 \text{ m/s} \cdot 80 \text{ N} = 464 \text{ W.}$$

Wie passen die beiden Ergebnisse zusammen? Da die Kette unter Zugspannung steht, steht der Fahrradrahmen unter Druckspannung. Wir nehmen vereinfachend an, dass der Druck nur durch die beiden waagrechten Streben des Rahmens aufgenommen wird. Außerdem bewegt sich der Fahrradrahmen. Es fließt also ein Energiestrom im Fahrradrahmen von hinten nach vorn, und zwar:

$$P = v \cdot F = 5 \text{ m/s} \cdot 80 \text{ N} = 400 \text{ W.}$$

Insgesamt werden also auch in diesem Bezugssystem 464 W – 400 W = 64 W vom Radfahrer zum hinteren Kettenrad transportiert, d. h. die Bilanz stimmt. Der Verlauf des Energiestroms ist aber je nach Bezugssystem ein anderer.

Ein solches Verhalten ist uns von anderen Strömen vertraut. Wenn man sich in einem Boot auf dem Rhein treiben lässt, ist die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in unserem Bezugssystem null. Vom Ufer aus gesehen ist sie das natürlich nicht. Dass sich bei Bezugssystemwechsel etwas mit dem Strom ändert, erscheint uns hier als Selbstverständlichkeit, da es sich um einen konvektiven Strom handelt, einen Strom, den man sich als Bewegung von individuellen Wasserportionen vorstellen kann. Das ist bei unserem Energiestrom in der Fahrradkette nicht mehr möglich. Trotzdem ändert auch er seinen Wert und seinen Verlauf bei Bezugssystemwechsel.

Wir schließen: Bei einem Bezugssystemwechsel kann sich der Verlauf eines Stroms (hier des Energiestroms) ändern.

### 3.3 Elektronenstrahl

Wir betrachten einen Elektronenstrahl (Abb. 3).

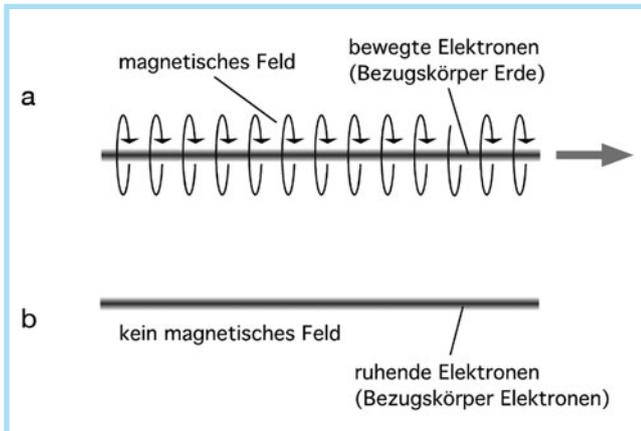


Abb. 3. Elektronenstrahl. (a) Von „außen gesehen“; (b) In einem Bezugssystem, in dem die Elektronen ruhen.

Die Ladung der Elektronen ist Quelle eines elektrischen Feldes, dessen Feldlinien radial nach außen verlaufen, sowie eines magnetischen Feldes mit kreisförmigen Feldlinien. Daraus folgt, dass ein Energiestrom (beschrieben durch den Poynting-Vektor) im Feld fließt, und zwar in dieselbe Richtung wie die Elektronen. Wir beschreiben nun dieselbe Realität in einem Bezugssystem, in dem die Elektronen des Strahls ruhen. Jetzt ist die elektrische Stromstärke null, es gibt kein magnetisches Feld mehr, und es strömt keine Energie mehr.

Wir schließen: Bei einem Bezugssystemwechsel kann ein magnetisches Feld auftauchen oder verschwinden.

### 3.4 Elektromagnetische Induktion

Wir machen das Induktionsexperiment der Abbildung 4 und beschreiben es in zwei Bezugssystemen. Im ersten (Abb. 4a), ruht die Leiterschleife, und der Magnet wird bewegt. Die magnetische Flussdichte innerhalb der Leiterschleife ändert sich. Nach der dritten MAXWELL-Gleichung wird eine elektrische Ringspannung induziert.

Betrachtet man denselben Vorgang im Bezugssystem des Magneten (Abb. 4b), so sieht die Beschreibung anders aus. Es findet

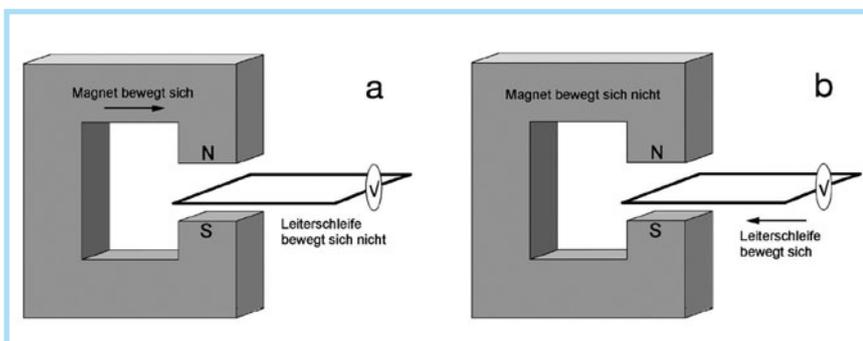


Abb. 4. Induktionsexperiment in zwei verschiedenen Bezugssystemen. (a) Die Leiterschleife ruht, der Magnet bewegt sich. (b) Der Magnet ruht, die Leiterschleife bewegt sich.

keine zeitliche Änderung der Flussdichte statt. Die Ladungsträger in dem Teil des Leiters, der sich im Magnetfeld befindet, bewegen sich mit dem bewegten Draht nach links. Sie erfahren eine Lorentz-Kraft in Richtung des Leiters. Zur Erklärung dieser Kraft brauchen wir die vierte MAXWELL-Gleichung.

Wir schließen: Die Deutung ein und desselben Experiments kann je nach gewähltem Bezugssystem unterschiedlich sein.

## 4 Inertialsystem, frei schwebendes Bezugssystem und beschleunigtes Bezugssystem

### 4.1 Inertialsystem und frei schwebendes Bezugssystem

Wir müssen auf den Begriff Inertialsystem zurückkommen. Hier noch einmal die Definition:

- Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem sich ein kräftefreier Körper geradlinig gleichförmig bewegt.

Mit „kräftefrei“ ist hier nicht gemeint, dass gar keine Kräfte auf den erwähnten Körper wirken, sondern, dass die Summe aller wirkenden Kräfte gleich null ist.

Hierzu äquivalent ist die folgende Formulierung:

- Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem die Newtonschen Gesetze gelten, oder in modernerer Sprache:
- Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem der Impulssatz gilt.

(Die drei NEWTONSchen Gesetze sind nichts anderes als eine Formulierung der Impulserhaltung in drei verschiedenen Situationen (HERRMANN, 1998).

Der Begriff Inertialsystem wurde von LUDWIG LANGE eingeführt. Seine Definition weicht von den oben angegebenen Definitionen etwas ab:

„...Inertialsystem« nennen wir ein System, worin ein sich selbst überlassener Punkt ruht, ein anderer in einer geraden Linie dahinschreitet, die den ersten nicht trifft;...“ (LANGE, 1885, 274)

Mit Punkt ist hier das gemeint, was wir heute Massenpunkt nennen und was mit „sich selbst überlassen“ gemeint ist, wird so erklärt:

„... indem man als »sich selbst überlassen« solche Materie bezeichnet, welche von anderer Materie hinreichend oder in der Ausdrucksweise der reinen Mathematik »unendlich« weit entfernt gedacht wird.“ (ebenda, 271)

Im Gegensatz zu der heute gebräuchlichen Definition, wird hier also verlangt, dass

auf den Körper gar keine Kraft wirkt, dass also nicht nur die Summe der wirkenden Kräfte null ist.

Ein Inertialsystem in diesem Sinn wäre etwa ein System das an einem Raumschiff befestigt ist, das sehr weit von allen Sternen antriebslos durch den Raum schwebt. Man nennt es auch frei schwebendes Bezugssystem.

Wir wollen im Folgenden bei der ersten Definition bleiben.

Wir definieren: Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem der Impulssatz gilt.

#### 4.2 Linear beschleunigtes Bezugssystem – Die Transformation der Gravitationsfeldstärke

Wir beschreiben im Folgenden mechanische Prozesse im Rahmen der klassischen, nichtrelativistischen Mechanik. Das Äquivalenzprinzip, d.h. die Gleichheit von schwerer und träger Masse folgern wir nicht aus der allgemeinen Relativitätstheorie, sondern akzeptieren es als Beobachtungsergebnis. Die Größe  $\vec{g}$ , die gewöhnlich Fallbeschleunigung oder Ortsfaktor genannt wird, ist die Feldstärke des Gravitationsfeldes. Die Gleichung

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

ist das Analogon zu

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}.$$

Wir wissen, dass sich in einem Inertialsystem ein kräftefreier Körper mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Nun gibt es dabei ein Problem: Wie stellt man fest, ob ein Körper K kräftefrei ist? Die Antwort lautet: Man muss die Eigenschaften von K, sowie die seiner Umgebung kennen. Ist der Körper K elektrisch geladen, und befindet sich in der Nähe ein anderer geladener Körper, so wirkt auf K eine elektrostatische Kraft. Ebenso könnte eine magnetische oder eine „Kontakt“-Kraft auf ihn wirken. Wie entscheidet man, ob eine Gravitationskraft wirkt? Das Problem dabei ist, dass man eine Gravitationskraft wegtransformieren kann, indem man den Vorgang in einem gegenüber dem Inertialsystem beschleunigten Bezugssystem beschreibt, in einem „frei fallenden“ oder „frei schwebenden“ Bezugssystem. In diesem Bezugssystem bewegt sich dann ein Körper (auf den keine sonstigen Kräfte wirken) geradlinig gleichförmig.

Wir betrachten ein Raumschiff, das sich irgendwo im interstellaren Raum, weit weg von allen Sternen, frei bewegt (Abb. 5a). Ein sich mit dem Raumschiff bewegendes Bezugssystem ist ein perfektes Inertialsystem. Alle mechanischen Experimente gehen so aus, wie es uns die bekannten Gesetze voraussagen. WILLY, der sich in dem Raumschiff befindet, wirft einen Ball. Dieser fliegt geradeaus bis zur Wand, wird reflektiert und fliegt wieder geradeaus.

Nun wird das Raketentriebwerk eingeschaltet, sodass das Raumschiff gleichmäßig beschleunigt wird (Abb. 5b). Gelten jetzt die Gesetze der Mechanik nicht mehr? Gilt der Impulssatz

nicht mehr? Fragen wir WILLY. Er stellt fest, dass er sich in einem Gravitationsfeld befindet. Er misst die Gravitationsfeldstärke mit Hilfe eines Federkraftmessers. Der geworfene Ball beschreibt, wie erwartet, eine Wurfparabel. Der Impulssatz wird befolgt.

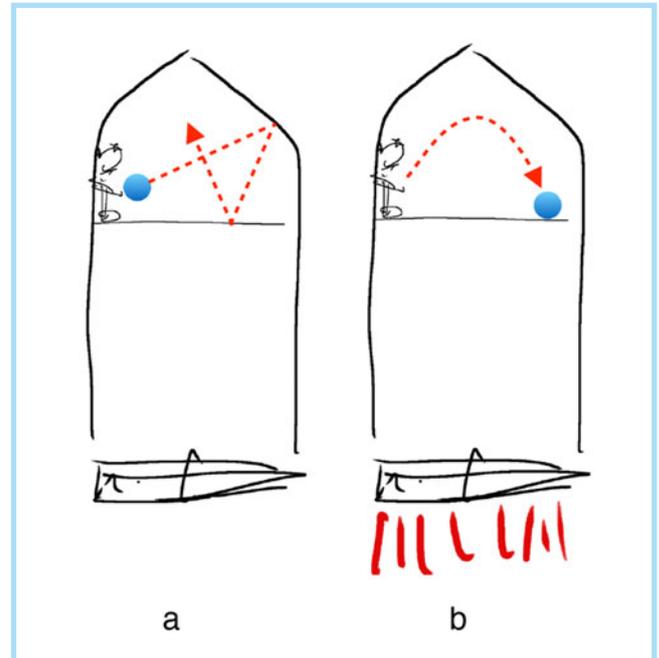


Abb. 5. Raumschiff, weit entfernt vom nächsten Stern. (a) Frei schwebend. (b) Die Triebwerke erzeugen eine konstante Beschleunigung.

Wir schließen: Auch in einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem gelten die NEWTONSchen Gesetze (gilt die Impulserhaltung). Beim Übergang von einem Inertialsystem in ein gleichmäßig beschleunigtes System entsteht ein homogenes Gravitationsfeld.

Wir wollen noch die zu dem Experiment in Abbildung 5 komplementäre Situation betrachten: den berühmten EINSTEIN’schen fallenden Aufzug (Abb. 6). Zunächst die Situation von Abbildung 6a.

WILLY und LILLY, die zwei unterschiedliche Bezugssysteme repräsentieren, beschreiben ein und dasselbe Experiment. WILLY (im Aufzug) fühlt sich schwerelos, in seinem Bezugssystem ist die Gravitationsfeldstärke null. Entsprechend schwebt auch die Kugel vor ihm. LILLY (außerhalb des Aufzugs) hat auch kein Problem mit der physikalischen Interpretation des Vorgangs: Es gibt ein Gravitationsfeld, der Aufzug mit WILLY und der Kugel befinden sich im freien Fall, sie bewegen sich beschleunigt nach unten.

Auch in der Situation von Abbildung 6b ist alles stimmig, sowohl für WILLY als auch für LILLY. Wir beginnen mit LILLY: Sie hält einen Körper, der an einer Feder hängt. Das Gravitationsfeld verursacht eine Kraft auf den Körper, der an der Feder hängt, die Feder wird gedehnt. Für WILLY dagegen ist die Gravitationsfeldstärke null. Die Feder wird gedehnt, weil der Körper über die Feder beschleunigt wird.

Was wir hier als Gedankenexperiment geschildert haben gibt es bekanntlich längst auch in der realen Welt: Für die Bewohner der ISS ist die Gravitationsfeldstärke null, das Schwerfeld scheint verschwunden zu sein.

Wir schließen: Was sich in einem Bezugssystem als Schwere äußert, äußert sich in einem anderen als Trägheit.

Noch einmal zurück zu dem Raumschiff in Abbildung 5b. Falls jemand fragt, welches denn die Quellen des dort beobachteten Gravitationsfeldes sind, muss man wohl antworten, die liegen im Unendlichen. Dabei mag man ein Unbehagen empfinden. Tatsächlich brauchen wir uns aber in dieser Hinsicht keine Sorgen zu machen. Zum einen ist die Aussage von einer Art, wie wir sie in anderen Zusammenhängen auch machen: Man hat keine Hemmungen das Feld einer Punktladung zu zeichnen, wobei die Feldlinien ins „Unendliche“ laufen. Damit wird auch der mechanische Zug, der parallel zu den Feldlinien herrscht, „ans Unendliche übergeben“. Man kann die Sache aber auch pragmatischer sehen. Überlegungen, bei denen das Unendliche ins Spiel kommt, sind stets metaphysischer Art. Halten wir uns lieber an WHEELERS Empfehlung: *“Don’t try to describe motion relative to faraway objects. Physics is simple only when analyzed locally.”* (MISNER, THORNE & WHEELER, 1973, 4)

Noch eine Bemerkung zu den Gravitationskräften, die WILLY in Abbildung 5b wahrnimmt. Sie werden beschrieben durch die altbekannte Gleichung  $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$ .

Traditionell wird eine solche Kraft als Scheinkraft bezeichnet. Der Grund für den Namen ist die Tatsache, dass es zu der Kraft keine reactio gibt. Nun ist dies ein Argument, das aus der Zeit stammt, als man noch keine Felder kannte und gezwungen war, die Situation mit Fernwirkungen zu beschreiben. Diese Zeit ist längst vorbei. Wenn man den Vorgang mit Hilfe eines Feldes beschreibt, so müsste man dieses konsequenterweise ein Scheinfeld nennen. Möchte man das wirklich? Das magnetische Feld des Elektronenstrahls in Abbildung 3a möchte man schließ-

lich auch nicht als Scheinfeld bezeichnen, nur weil seine Feldstärke in einem anderen Bezugssystem null ist.

Wir schließen: Ein Gravitationsfeld lässt sich lokal wegtransformieren. (Die Gravitationsfeldstärke lässt sich zu null machen.)

### 4.3 Rotierendes Bezugssystem

Wir hatten festgestellt, dass beim Übergang von einem Inertialsystem in ein anderes der Impulssatz gültig bleibt.

Gilt das auch für einen Übergang in ein rotierendes Bezugssystem? Die Antwort auf die Frage lautet: nein. Während es für die Translations-Geschwindigkeit keinen von der Natur ausgezeichneten Nullpunkt gibt, gibt es einen solchen für die Winkelgeschwindigkeit. Wer sich auf einem Karussell befindet merkt auch mit geschlossenen Augen, ob sich das Karussell (gegenüber einem Inertialsystem) dreht oder nicht. Im rotierenden Karussell gibt es leicht messbare Zentripetalkräfte; im nicht rotierenden verschwinden sie. Ein Körper, der im rotierenden Karussell ruht, ändert seinen Impuls nicht, obwohl eine Kraft (die Zentripetalkraft) auf ihn wirkt. Das bedeutet eigentlich, dass der Impulssatz verletzt wird. Um den Impulssatz (oder die Newtonschen Gesetze) zu retten, führt man daher zwei neue Kräfte ein: die Zentrifugalkraft und die Coriolis-Kraft.

Da es keinen Körper (oder anderes System) gibt, der sie ausübt, wie es die NEWTONSchen Gesetze erwarten lassen, nennt man sie gewöhnlich Scheinkräfte.

So leicht lässt sich das Problem aber nur beiseite räumen, wenn Kräfte auf die NEWTONSche Art, nämlich als Fernwirkungen beschrieben werden. Wenn im rotierenden Bezugssystem auf einen Körper eine Kraft (die Zentrifugalkraft) nach außen wirkt, die proportional zur Masse des Körpers ist, und wenn wir keine Fernwirkungen akzeptieren, so sollte auch hier gelten:  $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$  wobei  $\vec{g}$  die Gravitationsfeldstärke ist. Es scheint also ein zugehöriges Gravitationsfeld zu geben. Dieses hat nun aber eine hässliche, kaum zu akzeptierende Eigenschaft. Die

Feldlinien laufen vom Drehzentrum nach außen. Die Feldstärke, und damit die Feldliniendichte ist im Zentrum null, und sie nimmt nach außen zu. Das Feld hätte also überall im materiefreien Raum Quellen.

Unsere Empfehlung ist deshalb, diese Art Bezugssystemwechsel zu vermeiden. Schließlich hätte man die Bewegung eines Körpers auch in ein sich völlig chaotisch bewegtes Bezugssystem transformieren können, wobei man unzählige neue Scheinkräfte einführen müsste.

Man kann sich natürlich fragen, wie es dazu kam, dass rotierende Bezugssysteme in der Physik so beliebt geworden sind. Hierauf gibt es wohl zwei Antworten:

1. Sie wurden bereits von Newton verwendet. Aber schon sein Zeitgenosse GEORGE

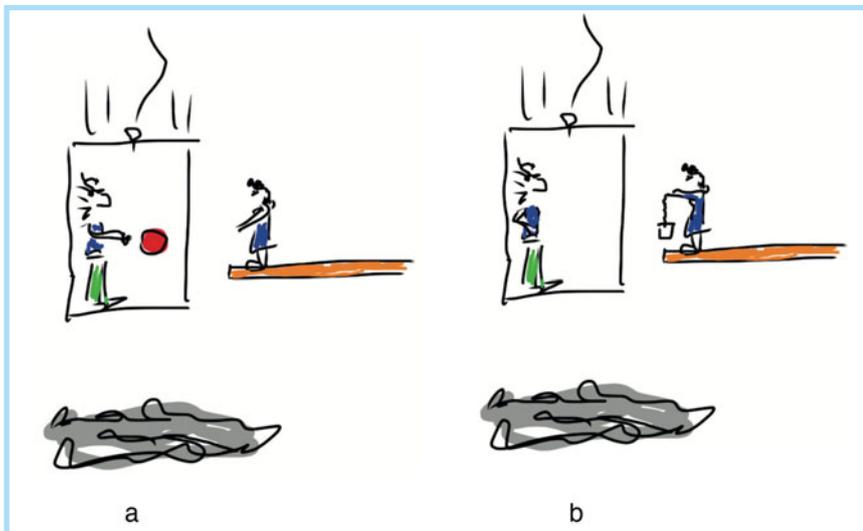


Abb. 6. Willy im frei fallenden Aufzug, Lilly schaut von außen zu. (a) Willy lässt eine Kugel fallen, (b) Lilly hält einen Körper, der an einer Feder hängt.

BERKELEY hatte vorgeschlagen, dass die Scheinkräfte reale Kräfte sind, die von den Fixsternen ausgehen (WHITROW, 1953). Für NEWTON, der Fernwirkungen ganz klar als eine Notlösung betrachtete, war es aber sicher ein unerträglicher Gedanke, dass Kräfte über so gigantische Entfernungen wirken sollten (NEWTON, 1692).

2. Sie haben sich in der Meteorologie eingebürgert, denn es scheint den Meteorologen leichter zu fallen, die Erde aus der Perspektive eines Erdbeobachters zu beschreiben als aus der eines „Außerirdischen“.

Gelegentlich wird übrigens eine noch „verrücktere“ Kraft eingeführt: die EULER-Kraft. Sie tritt in Bezugssystemen auf, die eine beschleunigte Drehbewegung ausführen.

Wir empfehlen: Man vermeide rotierende Bezugssysteme.

## 5 Bezugssystem-Wechsel in der Relativitätstheorie – das Zwillingsparadox

Was die Relativitätstheorie zu Bezugssystemwechseln sagt, ist trotz der einfachen Mathematik verwickelt. Man denke an die nicht enden wollenden Diskussionen zum Zwillingsparadox. Warum möchte man denn den Effekt unbedingt im Bezugssystem des reisenden Zwillings beschreiben, das während der Betrachtung zweimal gewechselt wird? (HERRMANN & POHLIG, 2021).

Wir schließen: Wechsle das Bezugssystem nicht während des Vorgangs, den du beschreibst.

Die spezielle Relativitätstheorie wird gewöhnlich aus der Forderung nach Bezugssystem-Unabhängigkeit der Grenzgeschwindigkeit  $c$  abgeleitet. Bezugssystemwechsel spielen daher in der Relativitätstheorie eine große Rolle. Die Transformationsgleichungen für Abstände und Zeitintervalle, die sich daraus ergeben, lernt man gleich zu Anfang. Es entsteht der Eindruck, die Relativitätstheorie sei im Wesentlichen eine Theorie der Bezugssystemwechsel – was zusätzlich durch ihren Namen suggeriert wird.

Folgt man dem historisch begründeten Weg, so geraten die eigentlich wichtigen Aussagen der Theorie in den Hintergrund. Die wesentlichen physikalischen Aussagen der speziellen Relativitätstheorie haben aber nichts mit Bezugssystemwechseln zu tun. Vor allem die Aussagen, die sie im Zusammenhang mit der Dynamik macht, versteht man am besten, ohne das Bezugssystem zu wechseln. Hier kurz zur Erinnerung:

- Die Energie-Masse-Äquivalenz;
- Der Energie-Impuls-Zusammenhang;
- Die Tatsache, dass es eine universelle Grenzgeschwindigkeit gibt.

Man kommt direkt zur relativistischen Dynamik, wenn man statt der Invarianz der Grenzgeschwindigkeit die Energie-Masse-Identität zum Ausgangsaxiom macht (HERRMANN & POHLIG, 2023).

Wir empfehlen: Beginne die Behandlung der speziellen Relativitätstheorie mit der relativistischen Dynamik.

In Kasten 1 sind alle bisher genannten Folgerungen und Empfehlungen als Regeln für den Umgang mit Bezugssystemen zusammengestellt.

Beim Wechsel von einem Bezugssystem in ein anderes ändern sich die Werte physikalischer Größen; die physikalischen Gesetze bleiben aber gültig.

Bei einem Bezugssystem-Wechsel kann sich der Verlauf eines Stroms ändern.

Bei einem Bezugssystem-Wechsel kann ein magnetisches Feld auftauchen oder verschwinden.

Die Deutung ein- und desselben Experiments kann je nach gewähltem Bezugssystem unterschiedlich sein.

Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem der Impulssatz gilt.

Auch in einem gleichmäßig beschleunigten Bezugssystem gelten die Newtonschen Gesetze (gilt die Impulserhaltung). Beim Übergang von einem Inertialsystem in ein gleichmäßig beschleunigtes System entsteht ein homogenes Gravitationsfeld.

Was sich in einem Bezugssystem als Schwere äußert, äußert sich in einem anderen als Trägheit.

Ein Gravitationsfeld lässt sich lokal wegtransformieren. (Die Gravitationsfeldstärke lässt sich zu null machen.)

Man vermeide rotierende Bezugssysteme.

Wechsle das Bezugssystem nicht während des Vorgangs, den du beschreibst.

Beginne die Behandlung der speziellen Relativitätstheorie mit der relativistischen Dynamik.

Kasten 1. Regeln für den Umgang mit Bezugssystemen

## 6 Wie sollen wir mit Bezugssystemwechseln im Unterricht umgehen?

In unserem eigenen Unterricht sprechen wir Bezugssystemwechsel über den größten Teil des Unterrichts gar nicht an, sondern beschreiben die jeweilige Erscheinung von vornherein in dem am besten geeigneten Bezugssystem (HERRMANN, 2019). Das bedeutet unter anderem, dass wir keine rotierenden Bezugssysteme einführen, also auch keine Zentrifugal- oder Coriolis-Kräfte.

Induktionserscheinungen beschreiben wir so, dass die zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte als Ursache einer Induktionsspannung erscheint.

Die spezielle Relativitätstheorie beginnen wir nicht mit der Invarianz der Lichtgeschwindigkeit und dem MICHELSON-MORLEY-Experiment, sondern ersetzen das Axiom „Bezugssystemunabhängigkeit von  $c$ “ durch das Axiom „Energie-Masse-Identität“.

Den Effekt, der gewöhnlich als Zwillingen-Paradox beschrieben wird, beschreiben wir so: jeder der beiden Zwillinge liest nur seine eigene Uhr ab. Sie stellen fest, dass die „Eigenzeiten“, die zwischen den beiden Treffen vergangen sind, verschiedene Werte haben – je nach Verlauf der zugehörigen Weltlinie.

Trotzdem ist bei uns das Thema Bezugssystemwechsel auch Unterrichtsgegenstand. Wir widmen ihm eine eigene etwa dreistündige Unterrichtseinheit. Dort werden die Konsequenzen von Bezugssystemwechseln in mehreren sehr unterschiedlichen Situationen untersucht, etwa die in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 beschriebenen Vorgänge; ebenso das Verschwinden oder Entstehen von Gravitationsfeldern beim Übergang zwischen gegeneinander beschleunigten Bezugssystemen.

Als Lernziele stehen dabei aber nicht die speziellen, betrachteten Vorgänge im Vordergrund, sondern einige allgemeine Regeln:

- Beim Wechsel des Bezugssystems können sich die Werte physikalischer Größen ändern, die Gesetze der Physik bleiben aber gültig.
- Wähle zur Beschreibung eines Phänomens das Bezugssystem, in dem die Beschreibung am einfachsten wird und vor allem: Wechsle das Bezugssystem nicht während des Vorgangs, den du beschreibst.

## Literatur

HERRMANN, F. (1998). Mengenartige Größen im Physikunterricht. *Phys. Blätter*, 54, 830–833.

HERRMANN, F. (2019). *Der Karlsruher Physikkurs, Sekundarstufe II, Band 4, Mechanik*, Kap 6. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000154289> (19.07.2024).

HERRMANN, F. & POHLIG, M. (2021). Zwei Möglichkeiten das Altern zu verlangsamen – oder doch nur eine?. *MNU-Journal*, 74, 478–483. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000158396> (19.07.2024).

HERRMANN, F. & POHLIG, M. (2023). Teaching relativity: A paradigm change. *The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting*, 2371-2380. DOI: 10.1142/9789811269776\_018

LANGE, L. (1885). *Ueber die wissenschaftliche Fassung des Galilei'schen Beharrungsgesetzes*. In: W. WUNDT (Hg.), *Philosophische Studien*. Band 2, (S. 266–298). Verlag von Wilhelm Engelmann. <https://digitalesammlungen.uni-weimar.de/viewer/image/lit29431/1/> (19.07.2024).

MISNER, C. W., THORNE K. S. & WHEELER J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman and Company, New York, 28th Printing.

NEWTON, I. (1692). *Letter of Newton to Richard Bentley*. The Newton Project. <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258> (19.07.2024).

WHITROW, G. J. (1953). Berkeley's Critique of the Newtonian Analysis of Motion. *Hermathena No. 82, Homage to George Berkeley (1685–1753)*: A commemorative Issue, pp. 90–112 <https://www.jstor.org/stable/23039103> (19.07.2024).

Prof. Dr. FRIEDRICH HERRMANN, [f.herrmann@kit.edu](mailto: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, [pohligh@kit.edu](mailto:pohligh@kit.edu), war Physik- Mathematik- und Informatiklehrer am Wilhelm-Hausenstein-Gymnasium in Durmersheim. Seit 2007 hat er am KIT einen Lehrauftrag im Bereich „Didaktik der Physik“. ■

## Korrektur zum Diskussionsbeitrag von ULRICH KÖPF im Heft 04/2024

In dem Diskussionsbeitrag hat sich bedauerlicherweise während des Redaktionsprozesses ein Fehler eingeschlichen. Die angegebene Gleichung ist zwar korrekt, aber im Falle von  $a = b$  ist die Gültigkeit der Gleichung  $a^b = b^a$  eine Trivialität. Die Gleichung hätte  $1,764922^5 = 5^{1,764922} = 17,12488$  lauten sollen. Wir bitten, diesen Fehler zu entschuldigen. ■

**Unterrichts-Ideen finden.**

SUCHE IM ARCHIV DES MNU-JOURNALS

MNU journal

Das Archiv umfasst die im MNU-Journal erschienenen Artikel der Jahrgänge 1992 bis 2021. Bei Angabe mehrerer Suchbegriffe werden alle Ergebnisse angezeigt, die mindestens einen dieser Begriffe enthalten.

Suchbegriffe:

Suchen

2500 Artikel des MNU-Journals wollen entdeckt werden.

Heft	Titel	Fach	Stufe
2005-02	Geometrisches Konstruieren - Unterschiedliche Zugänge am Beispiel eines gotischen Kirchenfensters erfahrbar machen	Mathematik	
2010-03	Bilder aus ganzrationalen Funktionen	Mathematik	
2013-06	Erkennen heißt Machen - Freihandversuche im Physikunterricht	Physik	
2017-02	Experimentieren mit Hexaflaxagonen - Strukturen explorieren, Vermutungen überprüfen	Mathematik	SI