148 Inertialsystem und Trägheitsgesetz

Zusammenfassung

Seit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wissen wir, dass die Unterscheidung zwischen richtigen Kräften und Scheinkräften, zwischen schwerer und träger Masse, sowie zwischen Inertial- und Nichtinertialsystem nicht möglich ist.

Gegenstand

Der Begriff „Inertialsystem“ spielt in der Physik von Schule und Hochschule eine wichtige Rolle. Man braucht ihn, um das Trägheitsgesetz zu formulieren:

„Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.“

Dieser Satz gilt nur, wenn man den entsprechenden Vorgang im „richtigen“ Bezugssystem beschreibt, nämlich in einem Inertialsystem. Und was ist ein Inertialsystem?

„In der Physik ist ein Inertialsystem (von lateinisch *iners* „untätig, träge“) ein Koordinatensystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig, gleichförmig bewegen.“

Ein Inertialsystem kann man näherungsweise „realisieren“: „Eine fast vollkommene Annäherung an ein Inertialsystem wäre erst durch eine antriebslose Rakete in interstellarem Raum, fern von allen Massen realisiert, falls sie nicht rotiert.“

In einem Gutachten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft wird dem *Karlsruher Physikkurs* vorgeworfen, dass der Begriff *Inertialsystem* nicht eingeführt wird [1].

Mängel

Nehmen wir uns als erstes den Trägheitssatz vor: „Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.“

Nun bewegt sich jeder beliebige Körper geradlinig gleichförmig, wenn man nur das Bezugssystem geeignet wählt. Der Trägheitssatz kann also nicht allgemein gelten. Er gilt, so lernt man (gewöhnlich erst nachträglich) nur in bestimmten Bezugssystemen, den Inertialsystemen. Wir können damit den Trägheitssatz besser formulieren: „In einem Inertialsystem bewegt sich ein kräftefreier Körper geradlinig gleichförmig.“ Woher weiß man aber, ob ein Bezugssystem ein Inertialsystem ist? Man nimmt einen Körper, von dem man weiß, dass er „kräftefrei“ ist, d.h., dass keine Kraft auf ihn wirkt, als Bezugskörper. Dieser legt das Inertialsystem fest. Wir können dann von jedem beliebigen anderen Körper sagen, ob er sich geradlinig gleichförmig bewegt oder nicht. So weit, so gut.

Eine Frage bleibt aber: Woran erkennen wir, dass der Bezugskörper kräftefrei ist? Wir können nicht sagen: „An seiner geradlinig-gleichförmigen Bewegung“ – denn er ist es ja gerade, der festlegt, was wir unter geradlinig-gleichförmig verstehen. Also müssen wir über die Kräftefreiheit anders entscheiden. Das scheint zunächst kein Problem zu sein. Wir kennen die Naturkräfte, wir kennen ihre Quellen und die entsprechenden Abstandsgesetze – wenigstens glauben wir das – und können so, eventuell im Gedankenexperiment, dafür sorgen, dass ein Körper kräftefrei ist: Wir richten es ein, dass keine elektrischen oder magnetischen Kräfte und auch keine Kontaktkräfte angreifen. Außerdem müssen wir dafür sorgen, dass keine Gravitationskraft angreift. Und hier haben wir nun doch ein Problem. Wir können Gravitationskräfte nicht ausschließen. Solange man glaubte, dass man „gravitostatische“ Kräfte (d.h. Kräfte, die durch Newtons Gravitationsgesetz beschrieben werden) von Trägheitskräften unterscheiden kann, gab es das Problem nicht, siehe oben: Man braucht nur in den interstellaren Raum zu gehen. Wenn man aber zugibt, dass diese beiden Arten von Kräften grundsätzlich nicht zu unterscheiden sind, so zerrinnt einem das Argument zwischen den Fingern. Wir können von einem Körper grundsätzlich nicht sagen, er sei kräftefrei oder er sei nicht kräftefrei. Er ist es in einem Bezugssystem, und in einem anderen ist er es nicht.

Gehen wir in den interstellaren Raum und lassen die Raketentriebwerke laufen. Gilt jetzt das Trägheitsprinzip nicht? Natürlich gilt es. Ein Körper, den wir in der Rakete loslassen oder auch anstoßen, bewegt sich nicht mehr geradlinig gleichförmig, aber er ist ja auch nicht mehr kräftefrei. Im Bezugssystem der Rakete ist die Gravitationsfeldstärke nicht mehr null, wir haben also eine Gravitationskraft, die auf unseren Körper wirkt, und die den Körper in Übereinstimmung mit dem 2. Newtonschen Gesetz beschleunigt. Die Newtonschen Gesetze gelten also auch in diesem „Nichtinertialsystem“. Wozu dann aber noch der Begriff Inertialsystem?

Herkunft

Wenn man das Bezugssystem, für das der Trägheitssatz angeblich gilt, meistens nicht ausdrücklich nennt, so wohl deshalb, weil es in der newtonschen Formulierung auch nicht vorkommt. Newton braucht aber, wenn er sein erstes Gesetz ausspricht, diese Festlegung nicht, denn bei ihm ist klar, gegen wen sich der Körper bewegt: gegen den absoluten Raum, den er wenige Seiten vorher eingeführt hat. Bei ihm ist auch klar, was man unter „kräftefrei“ versteht: Wenn keine Kräfte wirken außer denen, die er Scheinkräfte nannte. Und ob eine Kraft eine echte Kraft, also keine Scheinkraft ist, erkannte man daran, dass man einen Körper benennen konnte, der die Kraft ausübt. Bei Scheinkräften war das nicht der Fall.

Allerdings wurde schon zu Newtons Zeit, zwanzig Jahre nach der Veröffentlichung seiner *Principia*, diese Meinung erschüttert. Der irische Philosoph George Berkeley (1685 - 1753) schlug vor, dass die die Scheinkräfte verursachenden Körper die Sterne sind. Dieser Gedanke wurde viel später von Ernst Mach aufgegriffen. Damit wäre das Scheinkraftkriterium natürlich nicht mehr erfüllt. Die Scheinkräfte werden zu echten Kräften.

In der Gravitationsphysik bestand lange Zeit eine merkwürdige Situation: Man wusste, dass träge und schwere Masse gleich sind, hatte aber keinerlei Erklärung dafür. Einstein formuliert es 1916 so:

„Die schwere und die träge Masse eines Körpers sind einander gleich. Die bisherige Mechanik hat diesen wichtigen Satz zwar *registriert*, aber nicht *interpretiert*.“ [2]

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) lehrt uns nun, dass eine Erscheinung, die man in einem Bezugssystem durch die Trägheit erklärt, ihre Erklärung in einem anderen durch ihre Schwere erhält. Damit verschwindet die Unterscheidung von träger und schwerer Masse, genauso wie die zwischen Inertial- und Nichtinertialsystem.

Einstein schreibt 1922:

„Die eigentliche Leistung der (allgemeinen) Relativitätstheorie liegt darin, dass sie die Physik von der Notwendigkeit der Einführung des „Inertialsystems“ (bzw. der Inertialsysteme) befreit hat. Das Unbefriedigende in diesem Begriff liegt darin: Er wählt ohne Begründung unter allen denkbaren Koordinatensystemen gewisse Systeme aus. Es wird dann angenommen, dass die Gesetze der Physik *nur* in Bezug auf solche Inertialsysteme gelten (z. B. der Trägheitssatz und das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit). Dadurch wird dem Raum als solchem eine Rolle im System der Physik zuerteilt, die ihn vor den übrigen Elementen der physikalischen Beschreibung auszeichnet: Es wird bestimmend auf alle Vorgänge, ohne dass diese auf ihn zurückwirken; eine solche Theorie ist zwar logisch möglich, aber andererseits doch recht unbefriedigend. Newton hatte diesen Mangel deutlich empfunden, aber auch klar verstanden, dass es für die damalige Physik keinen anderen Weg gab. Unter den Späteren war es besonders Ernst Mach, der diesen Punkt klar ins Licht brachte.“ [3]

Entsorgung

Man könnte glauben, dass man auf den Begriff Inertialsystem nur dann verzichten kann, wenn man die Gravitation im Rahmen der ART behandelt. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass jede Aussage der ART voraussetzt, dass man die Tensorrechnung beherrscht und die Einsteinschen Feldgleichungen durchschaut. Das ist aber gewiss übertrieben. Die Identität von träger und schwerer Masse ist zwar in der ART enthalten, sie ist aber auch ohne diese zu verstehen. Man muss eben zu dem alten Wissen nur hinzunehmen, dass die Gleichheit von schwerer und träger Masse kein Zufall ist. Hier sei kurz skizziert, wie man mit dem Thema in der Schule, etwa in Klasse 11, umgehen kann.

Wir betrachten die Situation von Abbildung 1.

Abb. 1. Willy: „Die Kugel schwebt, die Gravitationsfeldstärke muss gleich null sein.“ Lilly: „Die Kugel fällt beschleunigt, die Feldstärke ist nicht null.“

Willy befindet sich in dem berühmten fallenden Aufzug, Lilly steht außerhalb. Für Willy (im Bezugssystem des Aufzugs) bewegt sich die Kugel nicht, sie schwebt. Willy findet das normal, denn für ihn ist die Gravitationsfeldstärke null, die Kugel ist kräftefrei. Lilly interpretiert das Geschehen anders: Die Feldstärke ist nicht null, auf die Kugel wirkt eine Kraft. Die Gravitationsfeldstärke ändert also, wie viele andere Größen auch, bei Bezugssystemwechsel ihren Wert.

In Abb. 2 geht es darum, zu begründen, weshalb die Feder gedehnt ist. Willy meint, die Gravitationsfeldstärke ist überall null. Die Feder ist gedehnt, weil der Körper, der an der Feder hängt, beschleunigt wird. Wegen seiner Trägheit widersetzt er sich der Beschleunigung. Lilly dagegen meint, die Dehnung der Feder habe nichts mit Trägheit zu tun, sondern komme durch das Gravitationsfeld und die Schwere zustande. Wir sehen also: Die Masse äußert sich, je nach Bezugssystem als Schwere oder als Trägheit.

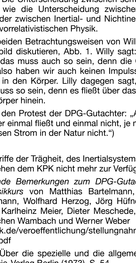

Abb. 2. Willy: „ Die Feldstärke ist null. Die Feder ist gedehnt, weil der träge Körper über die Feder beschleunigt wird.“ Lilly: „Die Feder wird gedehnt weil der schwere Körper an ihr zieht.“

Wir sehen also: Die Unterscheidung zwischen schwerer und träger Masse ebenso wie die Unterscheidung zwischen richtigen und Scheinkräften oder zwischen Inertial- und Nichtinertialsystemen ist ein Artefakt der vorrelativistischen Physik.

Wir wollen die beiden Betrachtungsweisen von Willy und Lilly noch im Impulsstrombild diskutieren, Abb. 1. Willy sagt: Der Impuls ändert sich nicht; das muss auch so sein, denn die Gravitationsfeldstärke ist null, also haben wir auch keinen Impulsstrom durch das Gravitationsfeld in den Körper. Lilly dagegen sagt, der Impuls ändert sich; das muss so sein, denn es fließt über das Gravitationsfeld Impuls in den Körper hinein.

(Ich höre schon den Protest der DPG-Gutachter: „Aber was ist das für ein Strom, der einmal fließt und einmal nicht, je nach Bezugssystem! Es gibt diesen Strom in der Natur nicht.“)

[1] „Präzise Begriffe der Trägheit, des Inertialsystems und des Reaktionsprinzips stehen dem KPK nicht mehr zur Verfügung.“

siehe: *Ergänzende Bemerkungen zum DPG-Gutachten über den Karlsruher Physikkurs* von Matthias Bartelmann, Fabian Bühler, Siegfried Großmann, Wolfhard Herzog, Jörg Hüfner, Rudolf Lehn, Rudolf Löhken, Karlheinz Meier, Dieter Meschede, Peter Reineker, Metin Tolan, Jochen Wambach und Werner Weber
www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/kpk-ergaenzung.pdf

[2] *A. Einstein:* Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1973), S. 54.

[3] *A. Einstein:* Grundzüge der Relativitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin (1970),S. 138.