

Inertialsystem und Wechselwirkungsgesetz

Friedrich Herrmann
Karlsruher Institut für Technologie

Eigentlich geht es im folgenden Vortrag noch einmal um dasselbe Thema wie im vorangehenden. Nämlich um die Frage: Gegen wen bewegt sich der Körper des ersten Gesetzes.

Eine Motivation für das Thema war das Gutachten der DPG, von dem Sie wahrscheinlich gehört haben. Dort wird dem Karlsruher Physikkurs der Vorwurf gemacht, es komme der Begriff „Inertialsystem“ nicht vor:

Präzise Begriffe der Trägheit, des Inertialsystems und des Reaktionsprinzips stehen dem KPK nicht mehr zur Verfügung.

Zum Begriff der Trägheit will ich hier nichts sagen. Ich glaube, er ist hinreichend klar, und er wird im KPK auch sorgfältig behandelt .

Der Begriff Inertialsystem kommt im KPK tatsächlich nicht vor.

Mit Reaktionsprinzip ist das dritte newtonsche Gesetz gemeint. Es steht im KPK zur Verfügung. Das hat der Gutachter nicht gemerkt.

Es geht also im Folgenden um den Begriff Inertialsystem.

Zunächst die Fragestellung: Wir hatten im vorigen Vortrag gesehen, dass das erste Gesetz, wenn man es allein betrachtet, sinnlos ist.

Wir hatten diskutiert, was Newton gemeint hatte: Die Bewegung des ersten Gesetzes ist eine absolute Bewegung, d.h. eine Bewegung gegen den absoluten Raum. Später wurde nun gesagt, den gebe es nicht. Also musste man eine andere Vorstellung entwickeln, damit das erste Gesetz wieder einen Sinn bekommt. Und das wurde getan. Man führte das „Inertialsystem“ ein. Ein Inertialsystem ist ein spezielles Bezugssystem. Das erste Gesetz bezieht sich also nach heutiger Auffassung auf Inertialsysteme.

Bevor wir uns fragen, wie der Begriff definiert ist, noch eine Bemerkung zur Formulierung des ersten Gesetzes.

Zunächst noch einmal die Newtonsche Formulierung:

Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.

Und zum Vergleich einige Formulierungen aus aktuellen Quellen:

Wikipedia:

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.

Gerthsen:

Ein kräftefreier Körper bewegt sich geradlinig gleichförmig.

Schulphysikwiki:

Ein Körper behält seinen Bewegungszustand bei, solange keine Kraft auf ihn wirkt.

Es ist auffällig, dass hier nicht eine moderne Sprache benutzt wird, sondern dass man sich an die Newtonsche Formulierung klammert. Das fällt uns Physikern vielleicht gar nicht so auf, aber sehen Sie einmal:

Etwa das Wort „verharren“, das heute sonst kaum noch jemand benutzt, – man sagt stattdessen bleiben oder beibehalten. Dann die Bezeichnung „Bewegungszustand“. Was ist

damit gemeint? Es ist die Geschwindigkeit gemeint. Behält den Bewegungszustand bei, bedeutet: „ändert seine Geschwindigkeit nicht“, und sonst nichts. Warum sagt man das nicht, denn das Wort Bewegungszustand könnte man auch anders verstehen. Es könnte auch die Geschwindigkeit *und* Beschleunigung gemeint sein, denn die Beschleunigung charakterisiert den Bewegungszustand auch. Oder wenn ein Körper eine Kreisbewegung macht – wäre das nicht auch ein Bewegungszustand? Der wird aber nach dem ersten Gesetz nicht beibehalten.

Und schließlich das „geradlinig-gleichförmig“. Es heißt nichts anderes als: konstante Geschwindigkeit. Warum sagt man es nicht? Weil es Newton so gesagt hat. Aber zu Newtons Zeit gab es noch keine Vektoren, also musste er die Konstanz der Geschwindigkeit für die Richtung und Betrag einzeln ausdrücken: die Richtung geradlinig, und der Betrag gleichförmig.

Sie sehen hieran wie erstarrt die Naturwissenschaft ist. Und schon deshalb ist sie für viele Schüler abstoßend. Allein um die Sätze zu verstehen, braucht es etliche zusätzliche Erklärungen.

Wie könnte man also in modernerer Sprache sagen ?

Ein Körper ändert seine Geschwindigkeit nicht, solange keine Kraft auf ihn wirkt.

Auch das lässt sich aber noch verbessern in:

Ein Körper ändert seinen Impuls nicht, solange keine Kraft auf ihn wirkt.

Das ist noch ganz im Newtonschen Sinn, nur die Sprache ist etwas entstaubt.

Wir würden natürlich noch einen Schritt weitergehen:

Ein Körper ändert seinen Impuls nicht, solange keine Impuls zu- oder abgeführt wird.

Zurück zur eigentlichen Frage: Auf wen bezieht sich die Bewegung, über die das Gesetz eine Aussage macht. Den absoluten Raum wollte man nicht. Also wurde das Inertialsystem eingeführt.

Aber zunächst hat absolute Raum die Leute anscheinend nicht gestört. Das Inertialsystem wurde nämlich erst viel später eingeführt, und zwar durch den Physiker und Psychologen Ludwig Lange (1863 - 1936), den heute kaum noch jemand kennt. Es war im Jahr 1885, also fast 200 Jahre nach Newton.

Hier Langes Definition:

Inertialsystem nennen wir ein System, worin ein sich selbst überlassener Punkt ruht, ein anderer in einer geraden Linie dahinschreitet, die den ersten nicht trifft;

Die Definition kommt mit einem hohen Anspruch an logische Strenge daher, aber man sieht ihr schon an, dass der Autor die Physik nur nebenbei betrieb. Was ist denn ein sich selbst überlassener Punkt? Nun, wir verstehen es schon. Ein Körper, auf den keine Kräfte wirken. Auf jeden Fall hat die Arbeit eine Lücke geschlossen, die dann entsteht, wenn man den absoluten Raum hinauswirft.

Sehen wir uns noch einige modernere Definitionen an, die hierzu äquivalent sind, und vielleicht etwas leichter zu verstehen:

Wikipedia:

In der Physik ist ein Inertialsystem ... ein Koordinatensystem, in dem sich kräftefreie Körper geradlinig, gleichförmig bewegen.

Einstein online (MPI Gravitationsphysik):

Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem das Trägheitsgesetz der Mechanik gilt: Körper, auf die keine Kräfte wirken, befinden sich in Ruhe oder laufen mit konstanter Geschwindigkeit auf geraden Bahnen.

(Wenn die Geschwindigkeit konstant ist, muss die Bahn gerade sein.)

Metzler:

Ein Bezugssystem, in dem „frei“ bewegliche Körper dem Trägheitsprinzip folgen, heißt Inertialsystem.

Und hier nochmal meine Formulierung:

Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper mit $\mathbf{v} = \text{const}$ bewegen.

Wenn man diesen Begriff hat, kann man also das erste Gesetz ordentlich formulieren, etwa so:

In einem Inertialsystem bewegt sich ein kräftefreier Körper mit konstanter Geschwindigkeit.

Das sieht nun aber so aus, als beiße sich die Katze in den Schwanz, also eine Tautologie:

Zusammen würde das ja heißen:

In einem Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper mit $\mathbf{v} = \text{const}$ bewegen, bewegen sich kräftefreie Körper mit $\mathbf{v} = \text{const}$.

Unsinn? Nein, doch nicht. Diese Zusammenfassung war böswillig falsch. Sie sollte lauten:

In einem Bezugssystem, in dem sich kräftefreie Körper A, B, C... mit $\mathbf{v} = \text{const}$ bewegen, bewegen sich auch alle anderen kräftefreien Körper P, Q, R,... mit $\mathbf{v} = \text{const}$.

Damit scheint die Sache zunächst mal klar zu sein.

Nun trifft man in manchen oder vielen Büchern aber das folgende Vorgehen an:

Das erste Gesetz wird vor dem Inertialsystem formuliert. Wir hatten gesehen: Dann ist seine Aussagekraft null. Und erst später wird der Begriff Inertialsystem eingeführt. Da ist natürlich die ganze Strenge weg, die ja hier sonst so gern zur Schau gestellt wird.

Nebenbei: die Definition ist zur Newtonschen Definition des absoluten Raums äquivalent.

Das waren viele Worte, um die Einführung des Begriffs Inertialsystem zu begründen. Und das kommt nun im KPK nicht vor. Gibt es dort vielleicht statt dessen den absoluten Raum? Natürlich nicht. Wir werden es gleich sehen.

Trotz der angestrebten Strenge ist nämlich hat die Definition des Begriffs Inertialsystem noch einen Makel. Dieser hat zu tun mit dem „kräftefrei“. Wie erkennen wir denn, ob ein Körper kräftefrei ist? Oder „sich selbst überlassen“ (Lange) oder „frei beweglich“ (Metzler). Zunächst einmal ganz einfach: Wir erkennen die Kräfte an ihren Quellen: wir erkennen, dass elektrische Kräfte wirken, wenn unser Körper geladen ist, und sich ein anderer geladener Körper in der Nähe befindet. Entsprechend erkennen wir magnetische Kräfte, und auch die so genannten Kontaktkräfte. Um Kräftefreiheit zu haben, müssen wir nur sicher stellen, dass solche Kräfte nicht auftreten. Bleiben noch die Gravitationskräfte. Aber die können wir doch auch ausschließen, oder nicht?

Im Gerthsen zum Beispiel steht:

Eine fast vollkommene Annäherung an ein Inertialsystem wäre erst durch eine antriebslose Rakete im interstellaren Raum, fern von allen Massen realisiert, falls sie nicht rotiert.

Um zu sehen, wo hier das Problem steckt, müssen wir uns zunächst ein für alle Male von Fernwirkungen verabschieden. Ob auf einen Körper eine Kraft wirkt oder nicht, prüfen wir nicht dadurch, dass wir nachschauen, ob sich irgendwo in der Ferne ein Körper befindet, der diese Kraft ausüben könnte. Wie entscheiden es lokal. Wenn wir das tun, können wir leicht elektrische und magnetische Kräfte erkennen: nämlich an dem lokal messbaren Feld.

Bei den Gravitationskräften ist das anders. Der Grund ist: Wie können grundsätzlich gravitostatische Kräfte nicht von Trägheitskräften unterscheiden.

Gehen wir in den interstellaren Raum, wie es der Gerthsen vorschlägt. In unserem Raumschiff gilt das Trägheitsprinzip und auch die beiden anderen Newtonschen Gesetze. Nun schalten wir die Triebwerke ein. Gelten nun die Newtonschen Gesetze im Bezugssystem des Raumschiffs nicht mehr? Wir lassen einen Gegenstand los. Er fällt hinunter. Wir schließen, dass ein Gravitationsfeld vorhanden ist. Wir prüfen es nach mit einem Federkraftmesser. Tatsächlich, das Fallen geschieht in Übereinstimmung mit dem 2. Gesetz. Gilt das erste? Ja, es gilt auch. Es sagt ja eine konstante Bewegung voraus, wenn keine Kräfte wirken, und wenn welche wirken, so ist die Bewegung nicht geradlinig-gleichförmig. Also es gilt!

Wir haben keine Möglichkeit gravitostatische von Trägheitskräften oder Scheinkräften lokal zu unterscheiden. Das bedeutet aber auch, dass wir prinzipiell nicht sagen können, ob ein Körper kräftefrei ist oder nicht. In einem Bezugssystem ist er kräftefrei, im anderen ist er es nicht. Und damit können wir auch nicht mehr sagen, ein Bezugssystem sei ein Inertialsystem oder es sei keines.

Die Unterscheidung zwischen richtigen und Scheinkräften ebenso wie die Unterscheidung zwischen Inertial- und Nichtinertialsystem sind Artefakte der vorrelativistischen Physik.

Ist das nicht eine etwas leichtsinnige Behauptung? Das steht doch so in keinem Physikbuch. Doch, in mindestens einem, nämlich vom großen Meister selbst. Ich möchte ihn zu Wort kommen lassen (Einstein, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie):

Die eigentliche Leistung der (allgemeinen) Relativitätstheorie liegt darin, dass sie die Physik von der Notwendigkeit der Einführung des „Inertialsystems“... 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).

Nun die Frage, wie man damit umgehen soll. Das waren ja etwas verwickelte Überlegungen. Unseren Schülern können wir das gewiss nicht zumuten. Aber wir haben uns ja auch gar nicht mit dem Phänomen selbst befasst, sondern mit der verwickelten historischen Entwicklung.

Wie gehen wir im Unterricht damit um?

Zunächst: Wir formulieren den Inhalt der Newtonschen Gesetze nicht in der Form, wie es Newton getan hat. Die Newtonschen Gesetze sind äquivalent zur Impulserhaltung. Mehr sind sie nicht. Sie können ersetzt werden durch

Impuls lässt sich nicht erzeugen oder vernichten.

– genau so, wie sich Energie, elektrische Ladung oder Drehimpuls nicht erzeugen oder vernichten lassen. Wie die Newtonschen Gesetze mit dem Impulssatz zusammenhängen wird noch in einem anderen Vortrag gezeigt. Dabei tritt das Problem, gegen wen man die Bewegung zu messen hat gar nicht auf. Der Impulssatz gilt einfach in jedem Bezugssystem.

Interessant ist die Geschichte mit dem Bezugssystemwechsel natürlich trotzdem, mit dem beschleunigten Raumschiff usw., und deshalb wird sie im KPK behandelt in einem anderen Kontext, nämlich in einem späteren Kapitel, in dem es ausschließlich um Bezugssystemwechsel geht. Aus diesem skizziere ich nun noch einen Ausschnitt:

Wir schauen uns Abbildung 1 an; in dem berühmten fallenden Aufzug befindet sich Willy, Lilly steht außerhalb. Im Bezugssystem des Aufzugs bewegt sich der Ball nicht. Willy sieht, dass keine Kraft auf den Ball wirkt, er kann also das 1. Gesetz anwenden. Außerdem schließt er, dass die Gravitationsfeldstärke null ist.



Abb. 1 Willy (links): Die Gravitationsfeldstärke ist null; Lilly (rechts): sie ist nicht null

Was Lilly betrifft, so sagt er: Ihr Impuls ändert sich, denn es wirkt eine Kraft auf Lilly, in Übereinstimmung mit dem 2. Gesetz.

Aus Lillys Sicht stellt sich die Situation so dar: Es wirken auf alle Körper Gravitationskräfte, sie kann die Gravitationsfeldstärke messen. Dadurch ändert sich der Impuls der Kugel, 2. Gesetz. Ihr eigener Impuls ändert sich nicht, denn es herrscht Kräftegleichgewicht, also Gesamtkraft null. Das sagt auch das Trägheitsgesetz.

Was wir hier sehen: In beiden Bezugssystemen gelten dieselben Gesetze, kein Bezugssystem ist ausgezeichnet. Und was wir noch sehen: Die Gravitationsfeldstärke ist bezugssystemabhängig.

Soll man damit Schwierigkeiten haben? Sicher nicht, außer man ist Gutachter der DPG. Die Gravitationsfeldstärke transformiert sich bei Bezugssystemwechsel, so wie sich andere Größen auch transformieren, etwa die Geschwindigkeit, der Impuls, die elektrische und die magnetische Feldstärke.

Noch ein Aspekt der Sache: Wir betrachten noch einmal Willy und Lilly, Abb. 2.

Wieder fragen wir, wie die beiden ein Experiment interpretieren. Lilly sagt: die Gravitationsfeldstärke ist von null verschieden, auf den Körper wirkt eine Kraft, darum wird die Feder verlängert. Oder kurz: Der Körper ist schwer.

Willy sagt, die Feldstärke ist null, aber Lilly ist beschleunigt, sie beschleunigt auch den Körper an der Feder, sie übt eine Kraft auf den Körper aus, über die Feder. Daher wird diese verlängert. Das liegt an der Trägheit des Körpers.

Wir sehen also: Die Masse äußert sich, je nach BS als Schwere oder als Trägheit.

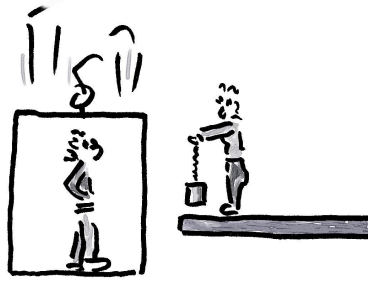


Abb. 2 Lilly: Der Körper ist schwer; Willy: der Körper ist träge.

Als Merksätze formulieren wir im KPK:

Die Gravitationsfeldstärke ist bezugssystemabhängig.

Die Masse äußert sich je nach Bezugssystem anders: als Schwere oder als Trägheit.

Hierzu auch noch einmal Einstein:

Die schwere und die träge Masse eines Körpers sind einander gleich. Die bisherigen Mechanik hat diesen wichtigen Satz zwar registriert, aber nicht interpretiert.

Abschließend noch einmal ein Blick auf die historische Entwicklung des Begriffs Inertialsystem:

1687 Newton: absoluter Raum

198 Jahre

1885 Lange: Inertialsystem

30 Jahre

1915 Einstein: Inertialsystem überflüssig

98 Jahre

2013 Inertialsystem immer noch da