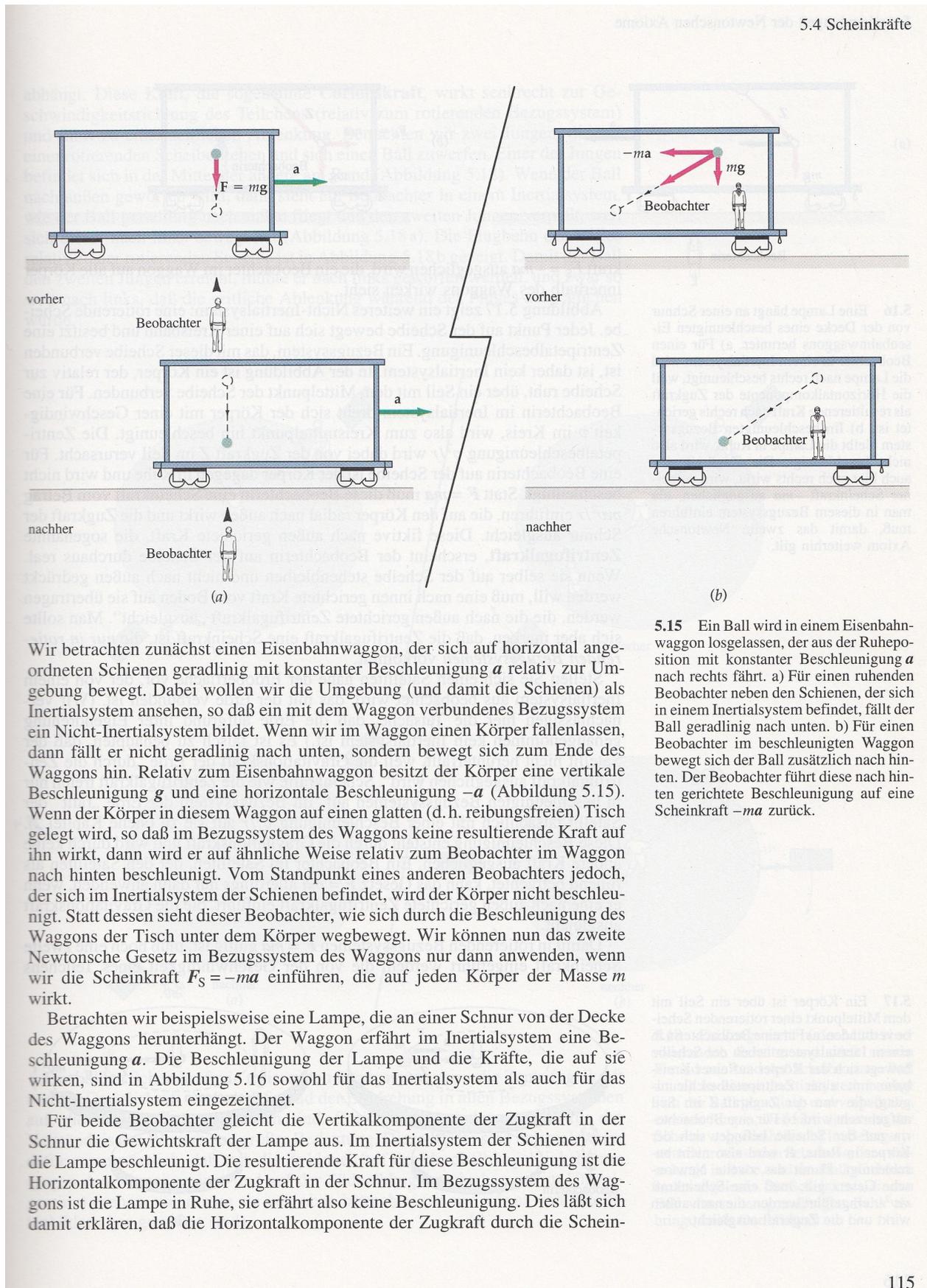


Scheinkräfte

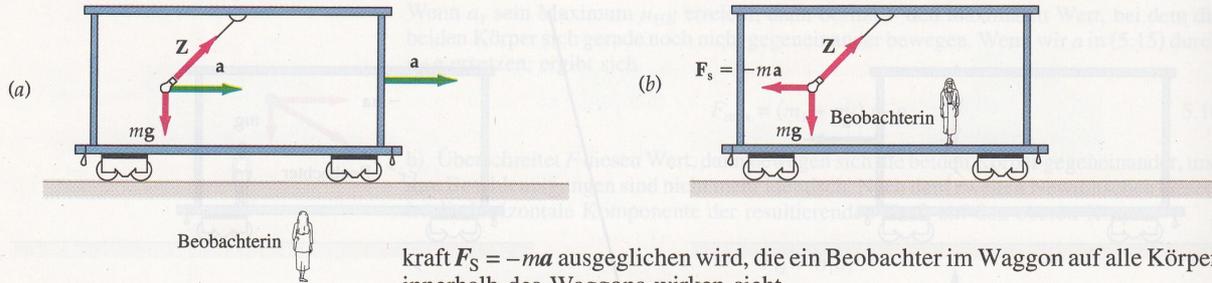
1. aus: Paul A. Tipler: Physik (1. Auflage). Spektrum Verlag

5.4 Scheinkräfte

Die Newtonschen Gesetze gelten nur in Inertialsystemen. Welches Ergebnis bekommt man, wenn man die Beschleunigung eines Körpers relativ zu einem Bezugssystem mißt, das seinerseits relativ zu einem Inertialsystem beschleunigt wird? In diesem Fall stimmt im beschleunigten Bezugssystem die resultierende Kraft, die auf den Körper wirkt, nicht mit dem Produkt aus Masse und gemessener Beschleunigung überein! In einigen Fällen ist der Körper relativ zum Nicht-Inertialsystem in Ruhe, obwohl ganz offensichtlich eine resultierende Kraft auf ihn wirkt. In anderen Fällen wirken keine Kräfte auf den Körper, aber er wird dennoch relativ zum Nicht-Inertialsystem beschleunigt. Wenn wir das zweite Newtonsche Gesetz $F = ma$ in einem beschleunigten Bezugssystem anwenden wollen, müssen wir fiktive Kräfte oder **Scheinkräfte** einführen, die von der Beschleunigung des Bezugssystems abhängen. Diese fiktiven Kräfte werden nicht wirklich übertragen. Sie dienen lediglich als Hilfsmittel, damit die Beziehung $F = ma$ auch für Beschleunigungen a gilt, die in Nicht-Inertialsystemen gemessen werden. Dem Beobachter im Nicht-Inertialsystem erscheinen diese Scheinkräfte allerdings genauso real wie alle anderen Kräfte auch.



5 Anwendungen der Newtonschen Axiome



5.16 Eine Lampe hängt an einer Schnur von der Decke eines beschleunigten Eisenbahnwaggons herunter. a) Für einen Beobachter in einem Inertialsystem wird die Lampe nach rechts beschleunigt, weil die Horizontalkomponente der Zugkraft als resultierende Kraft nach rechts gerichtet ist. b) Im beschleunigten Bezugssystem bleibt die Lampe in Ruhe, wird also nicht beschleunigt. Die Zugkraft, die auch hier nach rechts wirkt, wird von einer Scheinkraft $-ma$ ausgeglichen, die man in diesem Bezugssystem einführen muß, damit das zweite Newtonsche Axiom weiterhin gilt.

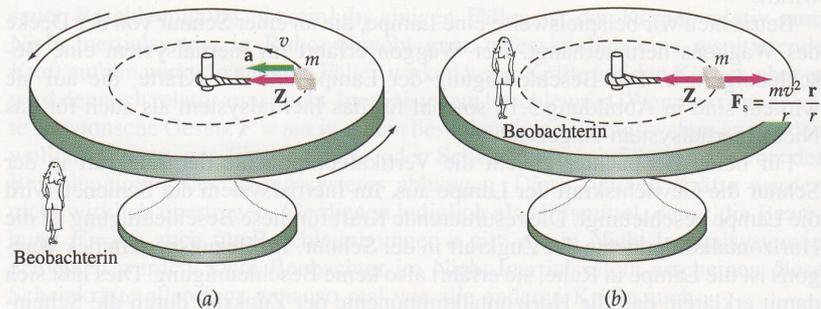
kraft $F_s = -ma$ ausgeglichen wird, die ein Beobachter im Waggon auf alle Körper innerhalb des Waggons wirken sieht.

Abbildung 5.17 zeigt ein weiteres Nicht-Inertialsystem: eine rotierende Scheibe. Jeder Punkt auf der Scheibe bewegt sich auf einer Kreisbahn und besitzt eine Zentripetalbeschleunigung. Ein Bezugssystem, das mit dieser Scheibe verbunden ist, ist daher kein Inertialsystem. In der Abbildung ist ein Körper, der relativ zur Scheibe ruht, über ein Seil mit dem Mittelpunkt der Scheibe verbunden. Für eine Beobachterin im Inertialsystem dreht sich der Körper mit einer Geschwindigkeit v im Kreis, wird also zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt. Die Zentripetalbeschleunigung v^2/r wird dabei von der Zugkraft Z im Seil verursacht. Für eine Beobachterin auf der Scheibe ist der Körper dagegen in Ruhe und wird nicht beschleunigt. Statt $F = ma$ muß diese Beobachterin eine Scheinkraft vom Betrag mv^2/r einführen, die auf den Körper radial nach außen wirkt und die Zugkraft der Schnur ausgleicht. Diese fiktive nach außen gerichtete Kraft, die sogenannte **Zentrifugalkraft**, erscheint der Beobachterin auf der Scheibe durchaus real. Wenn sie selber auf der Scheibe stehenbleiben und nicht nach außen gedrückt werden will, muß eine nach innen gerichtete Kraft vom Boden auf sie übertragen werden, die die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft „ausgleicht“. Man sollte sich aber merken, daß die Zentrifugalkraft eine Scheinkraft ist, die *nur in rotierenden Bezugssystemen* vorkommt.

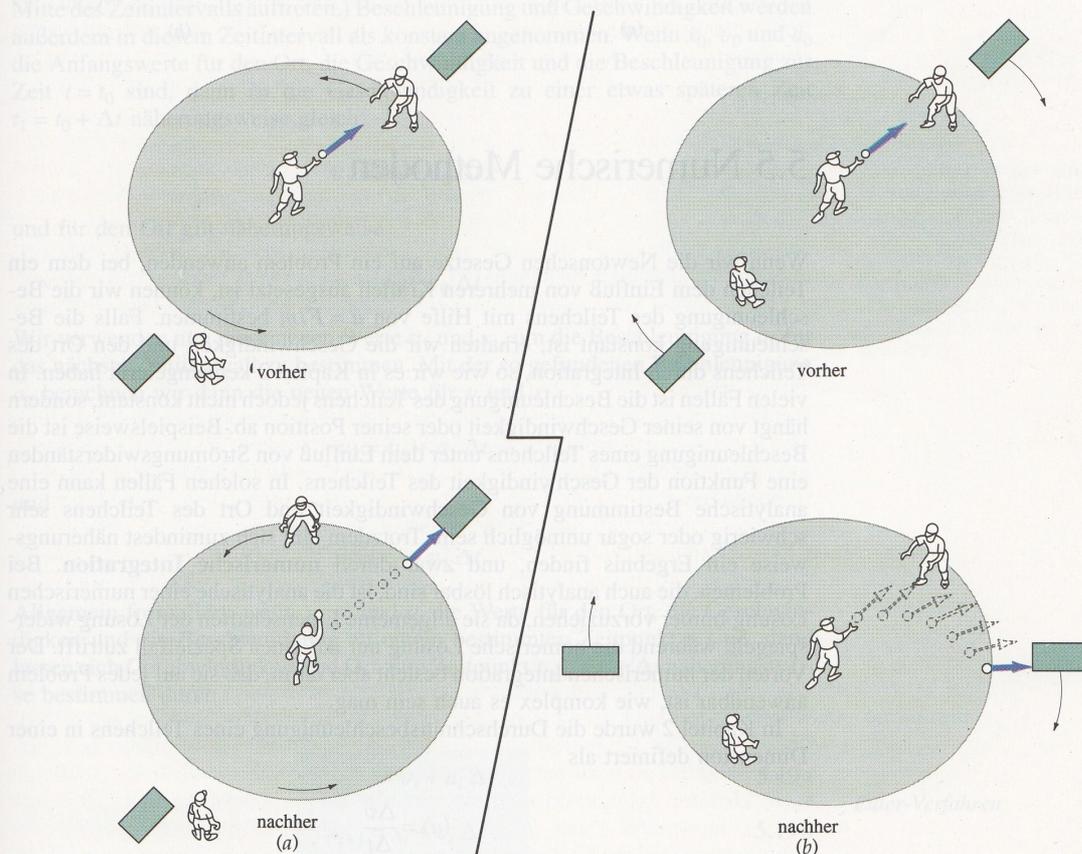
Stellen Sie sich einen Satelliten nahe der Erdoberfläche vor, der von einem Inertialsystem aus beobachtet wird, das mit der Erde verbunden ist. (Wir vernachlässigen hier die Tatsache, daß die Erde aufgrund ihrer Eigendrehung genaugenommen kein Inertialsystem ist.) Es ist falsch zu behaupten, daß der Satellit nicht herunterfällt, weil die Gravitationskraft der Erde „durch die Zentrifugalkraft ausgeglichen wird“. Scheinkräfte wie die Zentrifugalkraft treten nur in beschleunigten Bezugssystemen auf. Im Bezugssystem der Erde „fällt“ der Satellit tatsächlich mit einer Beschleunigung v^2/r auf sie zu (siehe Kapitel 2).⁴ Diese Beschleunigung entsteht durch die Gravitationskraft und wird durch keine andere Kraft ausgeglichen. Ein Beobachter im Satelliten, der den Satelliten als ruhend betrachtet, kann das Gesetz $F = ma$ allerdings nur dann anwenden, wenn er eine nach außen gerichtete Zentrifugalkraft einführt, die die Gravitationskraft ausgleicht.

Damit in rotierenden Bezugssystemen $F = ma$ gültig ist, muß noch eine zweite Scheinkraft eingeführt werden, die von der Geschwindigkeit eines Teilchens

5.17 Ein Körper ist über ein Seil mit dem Mittelpunkt einer rotierenden Scheibe verbunden. a) Für eine Beobachterin in einem Inertialsystem neben der Scheibe bewegt sich der Körper auf einer Kreisbahn mit einer Zentripetalbeschleunigung, die von der Zugkraft Z im Seil aufgebracht wird. b) Für eine Beobachterin auf der Scheibe befindet sich der Körper in Ruhe, er wird also nicht beschleunigt. Damit das zweite Newtonsche Gesetz gilt, muß eine Scheinkraft mv^2/r eingeführt werden, die nach außen wirkt und die Zugkraft ausgleicht.



abhängt. Diese Kraft, die sogenannte **Corioliskraft**, wirkt senkrecht zur Geschwindigkeitsrichtung des Teilchens (relativ zum rotierenden Bezugssystem) und führt zu einer seitlichen Ablenkung. Betrachten wir zwei Jungen, die auf einer rotierenden Scheibe stehen und sich einen Ball zuwerfen. Einer der Jungen befindet sich in der Mitte, der andere am Rand (Abbildung 5.18). Wenn der Ball nach außen geworfen wird, dann sieht ein Beobachter in einem Inertialsystem, wie der Ball geradlinig nach außen fliegt und den zweiten Jungen verpaßt, weil sich dieser nach links bewegt hat (Abbildung 5.18a). Die Flugbahn des Balles relativ zu der rotierenden Scheibe ist in Abbildung 5.18b gezeigt. Damit der Ball den zweiten Jungen erreicht, müßte er nach links geworfen werden, und zwar so weit nach links, daß die seitliche Ablenkung während des Fluges ausgeglichen würde.



5.18 Ein Junge steht in der Mitte einer rotierenden Scheibe und wirft seinem Freund am Rand der Scheibe einen Ball zu. a) In einem Inertialsystem bewegt sich der Ball geradlinig und verpaßt den zweiten Jungen, weil sich dieser mit der Scheibe weggedreht hat. b) Im Bezugssystem der rotierenden Scheibe ist der zweite Junge in Ruhe, und der Ball wird nach rechts abgelenkt. Die Scheinkraft, die den Ball von seiner geradlinigen Bahn abbringt, heißt Corioliskraft.

Die beiden Scheinkräfte in rotierenden Bezugssystemen – die Zentrifugalkraft und die Corioliskraft – treten aufgrund der Erddrehung in allen Bezugssystemen auf, die mit der Erde verbunden sind. Corioliskräfte sind vor allem für das Verständnis des Wetters von großer Bedeutung. Diese Kräfte sind beispielsweise dafür verantwortlich, daß sich die Zyklonen auf der Nordhalbkugel linksherum (gegen den Uhrzeigersinn) und auf der Südhalbkugel rechtsherum (im Uhrzeigersinn) drehen, wenn man sie von oben betrachtet (so wie wir es von Satellitenbildern her gewohnt sind).

2. aus: Rainer Müller: Klassische Mechanik (2. Auflage). De Gruyter

358 Kapitel 12 Gezeiten und beschleunigte Bezugssysteme – Raumstationen

12.8 Umgang mit Scheinkräften

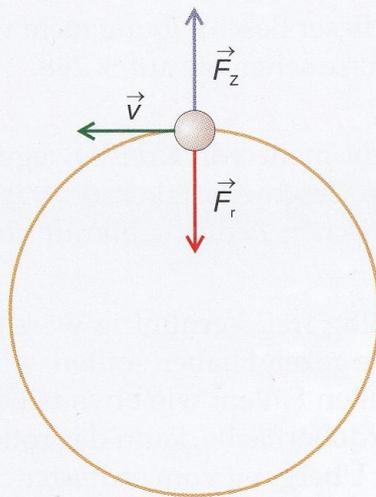
12.8.1 Schein oder Nicht-Schein? – Das ist hier die Frage

Bei der Beschreibung von Kreisbewegungen wird in den meisten Fällen mit der Zentrifugalkraft argumentiert. In neun von zehn Fällen misslingt dabei jedoch etwas. Die Erfahrung zeigt, dass nur die wenigsten es schaffen, konsistent mit Scheinkräften und beschleunigten Bezugssystemen umzugehen.

Was ist hier schiefgegangen?

Die Zeichnung und der Text in Abb. 12.37 stammen aus einer Physik-Formelsammlung für Studierende. Sie sind kennzeichnende Beispiele für eine falsche Erklärung der Kreisbewegung. Das Grundübel liegt darin, dass keine Klarheit über das verwendete Bezugssystem herrscht und die verschiedenen Begriffe wahllos durcheinandergeworfen werden.

- (1) Die eingezeichnete Kreisbahn bezieht sich auf ein Inertialsystem. Im rotierenden Bezugssystem ruht der Körper.



Bei der Kreisbewegung herrscht Gleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft \vec{F}_z und der Zentripetalkraft \vec{F}_r , die den Körper auf der Kreisbahn hält.

Abb. 12.37: Falsche Erklärung der Kräfte bei der Kreisbewegung

- (2) Der Begriff Zentrifugalkraft ist nur in Bezug auf ein rotierendes Bezugssystem definiert. Wenn es überhaupt Zentrifugalkräfte gibt, dann sicher nicht in Inertialsystemen.
- (3) Als Zentripetalkraft bezeichnet man jede Kraft, die einen Körper auf eine Kreisbahn zwingt. Daher bezieht sich der Begriff auf das Inertialsystem, weil die Bahn des Körpers nur hier eine Kreisbahn ist.
- (4) Der eingezeichnete Geschwindigkeitsvektor bezieht sich ebenso auf das Inertialsystem; im rotierenden Bezugssystem hat die Geschwindigkeit den Wert null.

Das gleichzeitige Vorkommen von Zentripetal- und Zentrifugalkraft in einer physikalischen Argumentation ist ein sicheres Anzeichen dafür, dass etwas nicht stimmt.

12.8.2 Konsistente Beschreibungen der Kreisbewegung

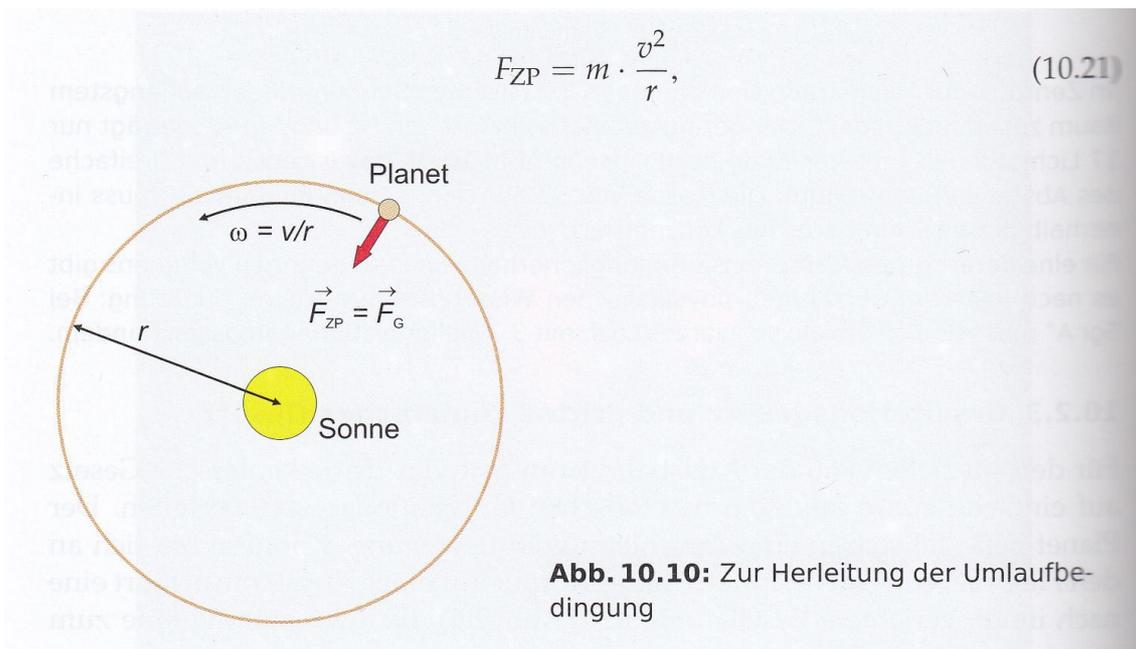
Einerlei ob Sie die Bewegung eines Planeten oder der Kugel beim Hammerwurf beschreiben möchten – es gibt immer zwei Möglichkeiten, die Kreisbewegung konsistent zu beschreiben: im Inertialsystem oder im rotierenden Bezugssystem. Bei jeder Argumentation muss man sich zu Beginn für ein Bezugssystem entscheiden und diese Wahl dann konsequent durchhalten.

(1) Beschreibung im Inertialsystem

Im Inertialsystem bewegen sich Kugel und Planet auf Kreisbahnen. Es handelt sich um eine beschleunigte Bewegung, daher kann kein Kräftegleichgewicht herrschen. Auf den Körper wirkt eine nach innen gerichtete Kraft, die ihn auf eine Kreisbahn zwingt. Man bezeichnet sie als Zentripetalkraft. Es ist keine eigenständige Kraft, immer muss eine andere Kraft (Seilkraft, Gravitationskraft) die Rolle der Zentripetalkraft über-

nehmen. Zentrifugalkräfte kommen in dieser Beschreibung nicht vor. Die dieser Argumentation angemessene Skizze sehen Sie auf S. 268.

Skizze von Seite 268:



(2) Beschreibung im rotierenden Bezugssystem

Im rotierenden Bezugssystem wird nicht mehr von Kreisbewegung gesprochen. Planet und Kugel ruhen. Ihre Geschwindigkeit $v' = 0$ ändert sich nicht, weil Kräftegleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft und Gravitationskraft (bzw. Seilkraft) herrscht.

In der Wahl des Bezugssystems sind Sie völlig frei. Vernünftig wäre es, das einfachere zu wählen. Wie Ihnen die Beispiele gezeigt haben sollten, wird dies meist das Inertialsystem sein. Nur in speziellen Fällen, wie etwa bei der Beschreibung von Tiefdruckgebieten auf der Erdoberfläche, kann das rotierende Bezugssystem sinnvoll sein. Hier würde der Übergang vom erdfesten System in ein Inertialsystem zu viel Umdenken erfordern.

12.8.3 Kann man Scheinkräfte spüren?

Oft wird eingewendet, dass man die Scheinkräfte doch spüren kann. Jedes Mal wenn man in einem Bus steht, der um eine Kurve fährt, wird man nach außen gedrückt und fällt fast um.

Lassen Sie uns analysieren, welche Kräfte man bei der Kurvenfahrt eigentlich spürt. Sehen wir uns den Vorgang vom Standpunkt eines am Straßenrand stehenden Beobachters an (also aus einem Inertialsystem). Der Bus fährt um die Kurve, und nach dem Trägheitsgesetz sieht Ihr Körper erst einmal keine Veranlassung dazu, das Gleiche zu tun. Allerdings übt der Bus auf Ihre Fußsohlen eine Reibungskraft aus, die Ihre Füße mit ihm in die Kurve zwingt. Die Reibungskraft wirkt als Zentripetalkraft. Ihr Rumpf bewegt sich unterdessen noch weiter geradeaus. Deshalb fallen Sie fast hin und bewegen sich (gegenüber dem Bus) nach außen. Eine Kraft, die nach außen auf Ihren Rumpf wirkt, haben Sie während des ganzen Vorgangs nicht gespürt.

Wenn Sie sich mit den Händen an einer Haltestange festhalten oder an der Außenwand des Busses abstützen, wirkt die Kraft der Stange (oder der Wand) auf ihre Hände zusätzlich als Zentripetalkraft. Sie können auf diese Weise das Umfallen verhindern.

Eine analoge Argumentation gilt für die Fahrt im Kettenkarussell, für den Looping in der Achterbahn und für alle anderen Bewegungen auf Kreisbahnen. Die Kräfte, die Sie *spüren*, werden immer von anderen Gegenständen auf Ihren Körper ausgeübt. Für die Zentrifugalkraft dagegen bleibt die Frage: „Welcher Körper übt sie aus?“ unbeantwortet.