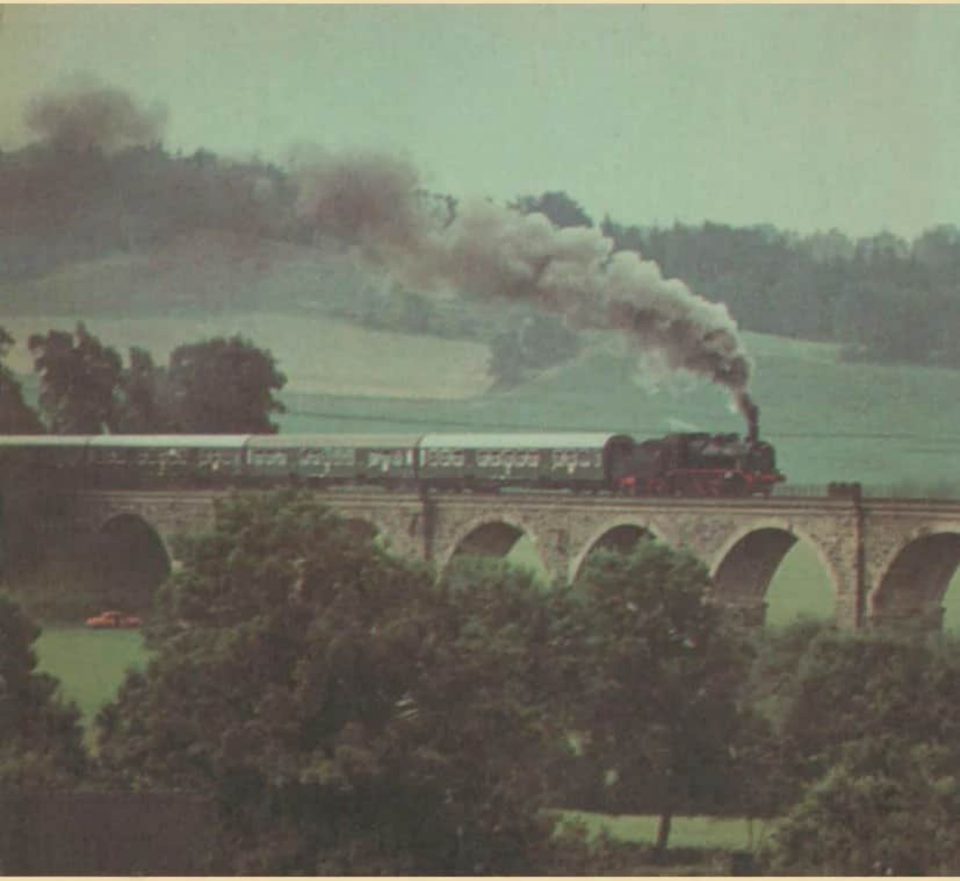
Kleine
Naturwissenschaftliche
Bibliothek

LEIPZIG



ANDERS

Reisebegleiter Physik

Reisebegleiter Physik

S. Anders

Mit 62 Abbildungen

LEIPZIG

BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft
Leipzig 1989

Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek · Band 67
ISSN 0232-346X

Autor:
Oberlehrer Siegfried Anders,
Karl-Marx-Universität Leipzig

Anders, Siegfried:
Reisebegleiter Physik / S. Anders. – 1. Aufl. – Leipzig : BSB
Teubner, 1989. – 76 S. : 62 Abb.
(Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek; 67)
NE: GT

ISBN 978-3-322-00688-2 ISBN 978-3-322-94559-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-94559-4

1. Auflage
VLN 294-375/86/89 · LSV 1109
Zeichnungen: Heinz Kutschke
Lektor: Dipl.-Met. Christine Dietrich

Gesamtherstellung: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig,
Betrieb der ausgezeichneten Qualitätsarbeit, III/18/97
Bestell-Nr. 666 521 9
00480

Vorwort

Reisen bildet. Das ist eine weit verbreitete Erkenntnis. Meistens denkt man dabei an die Erlebnisse am Zielort der Reise. Das Büchlein will demgegenüber darauf aufmerksam machen, daß es schon während der Fahrt mit dem Zug viel Interessantes zu beobachten gibt, Vorgänge, die des Nachdenkens wert sind.
Das Buch konzentriert sich auf physikalische Zusammenhänge. Dem Gegenstand entsprechend sind die behandelten Erscheinungen vorwiegend in der Mechanik und in der Thermodynamik angesiedelt. Wo es sich anbot, wurden Beziehungen zur modernen Physik hergestellt.
Alle beschriebenen Vorgänge werden erklärt. Das Anliegen dabei war, das Prinzip der Faßlichkeit nicht zu verletzen, die Begründungen anschaulich zu gestalten und komplizierte mathematische Herleitungen zu vermeiden.
Dieses Buch wendet sich an einen breiten Kreis naturwissenschaftlich interessierter Leser. Es will zum tieferen Nachdenken über physikalische Erscheinungen anregen, die alle mit dem Reisen zusammenhängen.

Leipzig, im September 1988 Siegfried Anders

Inhalt

Einleitung

Nikolai Leskow schrieb einmal: „Das Wichtigste für einen Reisenden ist der Weggenosse: in Gesellschaft eines guten und verständigen Gefährten lassen sich selbst Kälte und Hunger leichter ertragen."

Unser Weggenosse und Gefährte – unser Reisebegleiter – soll jetzt die Physik sein. Zwar gilt es nicht, Hunger und Kälte zu ertragen, aber auch in den Gefilden der Naturwissenschaften kann man Kameraden brauchen.

Kann denn Physik eine Reise interessant machen? Ist sie als Naturwissenschaft nicht etwas trocken? Wir hoffen natürlich, daß diese Einwände des skeptischen Lesers am Ende der Lektüre entkräftet sind, könnten aber jetzt schon mit der Frage kontern: Was soll denn interessanter sein als die uns umgebende Natur? Wie dem auch sei: Eine Reise steckt voller Physik. Man muß sie nur sehen wollen.

Als Fahrzeug wählen wir einen Eisenbahnzug. Wir geben ihm den Vorrang vor anderen Verkehrsmitteln, weil er am besten eine ungestörte Beobachtung gestattet und weil es sogar möglich ist, im Zug kleine Experimente durchzuführen.

Der Zug, in dem wir reisen, ist unser Labor. Zweifellos ein außergewöhnliches Labor! Es wird beschleunigt und gebremst, es fährt geradeaus und durch Kurven, es überwindet Steigungen genauso wie Gefälle, so wie wir es wollen. Dazu kommt, daß unser Zug bei Tag und Nacht fährt sowie zu jeder Jahreszeit. Wir haben mit unserem Zug also ein Labor zur Verfügung, das sich gegenüber unserem gewohnten Bezugssystem, der Erde, gleichförmig und beschleunigt bewegen kann. Darüber hinaus wirken auf unser Labor bewegungsfördernde und bewegungshemmende Kräfte ein, je nach Bedarf. Dieses vielseitige Labor steht uns zur Verfügung. Wir müssen nur einsteigen und ein wenig warten. Bald startet der Wagen mit uns zu einer physikalischen Reise. Am Ende dieser Reise werden wir auf viele Fragen eine Antwort wissen. Einige von ihnen seien genannt:

- Kann ein Bett aus Stein angenehm sein?
- Kann ein Ei plötzlich vom Tisch rollen, ohne daß es jemand berührt?
- Kann ein Pendel in Schräglage hängenbleiben?

- Kann man in einem schnellfahrenden Zug problemlos Kaffee einschenken?
- Bewegt sich der Bahnhof oder der Zug?
- Kann man schneller als der Schnellzug sein?
- Kann man schneller als das Licht sein?
- Kann sich die Sonne von West nach Ost bewegen?
- Kann ein Körper gleichzeitig zwei verschiedene Bahnkurven durchlaufen?
- Gilt in einem fahrenden Zug die Spezielle Relativitätstheorie?
- Kann eine Fliege einen Expreßzug überholen?
- Wieso kann eine Lokomotive den schweren Zug ziehen?
- Beschleunigt ein anfahrender Zug die Erde?
- Warum kann man in einem Zug, der durch eine Kurve fährt, schwer geradeausgehen?
- Wieso beschlagen die Scheiben des Zuges nur innen?
- Wird eine Eisenbahnstrecke bei Erwärmung länger?
- Warum wird die Oberleitung im Zickzack verlegt?
- Kann man mit Hilfe von Regentropfen die Geschwindigkeit des Zuges messen?
- Wie alt ist das Weltall?

Vor der Abfahrt

Bitte einsteigen und Platz nehmen! Die Reise in die Physik kann beginnen. Spezielle Vorbereitungen sind kaum notwendig. Unsere Experimente führen wir im wesentlichen mit alltäglichen Gegenständen durch. Mitzubringen ist lediglich die Bereitschaft zum genauen Beobachten, zum Staunen, zum Fragen und zum Mitdenken. Notwendig ist weiter ein freier Blick aus dem Fenster und ein wenig Platz zum Experimentieren.
Das Frühstück liegt bzw. steht schon auf dem kleinen Tischchen am Fenster. Dabei sind ein Ei und eine Flasche Limonade. Wir gießen noch etwas Kaffee in eine Tasse (Abb. 1). Wir ahnen noch nicht, daß sich diese alltäglichen Dinge schon bald sehr eigenartig verhalten werden und daß wir sie als Gegenstände physikalischer Experimente, ja als Beweismittel verwenden können.

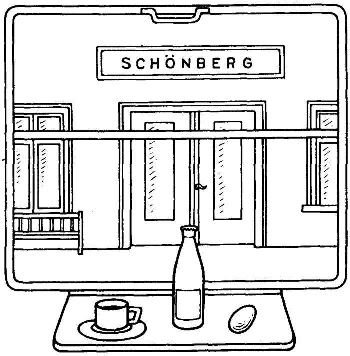


Abb. 1. Vor Reisebeginn

Übrigens wäre es gut, sich jetzt schon einen Platz auszusuchen, der zum Anbringen eines improvisierten Pendels geeignet ist.
Das sind aber schon alle Vorbereitungen. Die Reise könnte beginnen. Erwartungsvoll schmiegen wir uns in das weiche Polster. Da – noch vor der Abfahrt – nähert sich schon die erste Frage: Wieso ist das Polster eigentlich weich, eine Holzbank aber hart? Die Physik hat die Antwort parat. Das Polster kann sich im Gegensatz zur Holzbank unserem Körper anpassen. Dadurch wird unsere Auflagefläche vergrößert. Da der Druck p gleich dem Quotienten aus der Kraft F und der Fläche A ist – $p = F : A$ –, ist der Druck beim Polster kleiner als beim Holzsitz. Das empfinden wir als angenehm. Aber müßte dann nicht ein Bett aus Stein, das genau nach unseren Körpermaßen hergestellt wurde, von uns als sehr angenehm empfunden werden? So ist es in der Tat, denn infolge der großen Auflagefläche ist der Druck minimal. Daß wir trotzdem das Polster vorziehen, liegt an seiner Fähigkeit, alle unsere Lageveränderungen mitzumachen. Das kann der Stein nicht. Er ist bequem nur für eine einzige Lage, für alle anderen hingegen ist er äußerst unbequem.
Das war gewissermaßen eine Frage auf Vorschuß. Nun aber beginnt die Reise.

Beobachtungen beim Abfahren

Geräuschlos gleitet der Zug aus der Halle. Es ist ein moderner Zug mit sehr hoher Beschleunigung.
Plötzlich ruft ein Kind erregt: „Mutti! Mutti! Der Bahnhof fährt ab!" Selbstverständlich wird dieser Ausruf eines Kindes belächelt und belacht. Sehr zu unrecht, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden.
Im Moment aber bleibt uns nicht viel Zeit, über diese Episode nachzudenken. Im Abteil geschehen seltsame Dinge, die einem Gruselfilm entstammen könnten: Eine unsichtbare Kraft drückt uns tiefer in das Polster. Plötzlich, ohne daß es jemand berührt hat, rollt das Ei vom Tisch. Die Oberfläche der Limonade in der Flasche stellt sich schräg. Das improvisierte Pendel – ein Apfel an einem Faden – wird durch unsichtbare Kräfte ausgelenkt und bleibt in Schräglage hängen. Dem Reisenden im Nebenabteil mißlingt das Eingießen von Kaffee gründlich. Er ist schockiert, weil ihm das noch niemals widerfuhr. Fast paßt es in das Ensemble seltsamer Ereignisse, daß sich die Pendeltür zwischen den Abteilen öffnet, ohne daß jemand hereinkommt. Ein Reisender, der im Gang nach vorn gehen will, muß mit einem unsichtbaren Widerstand kämpfen, so als wolle er einen steilen Berg hinaufgehen.
Das Erstaunlichste an all diesen sonderbaren Ereignissen ist aber eigentlich Folgendes: Keiner der Erwachsenen wundert sich über das alles. Keinem läuft eine Gänsehaut über den Rücken, offenbar auch denen nicht, die von gruseligen Filmen und Geschichten immer sehr gepackt werden und manchmal sogar an besonders spannenden Stellen das Zimmer verlassen. Das ist man doch alles gewohnt. Das erschreckt keinen.
Und doch ist es äußerst merkwürdig, wenn sich Körper zu bewegen beginnen, ohne daß sie jemand oder etwas berührt. Darüber muß nachgedacht werden. Das verlangt eine Erklärung.
Aber wie es sich für einen echten Spuk gehört, ist er ganz plötzlich verschwunden. Die Dinge kehren in ihre normale Lage zurück, man kann wieder problemlos Kaffee einschenken, und das Ei, auf den Tisch zurückgelegt, bleibt ruhig liegen.
Ist nun also alles in Ordnung? Wir glauben das nicht. Wir meinen vielmehr, daß man sich die Frage stellen muß, wieso der Spuk vorbei ist. Der Zug fährt doch noch, und nicht langsam.

Davon überzeugt uns ein Blick aus dem Fenster. Aber was ist das? Wenn man genau hinschaut, bemerkt man auch in der Welt vor dem Fenster merkwürdige Vorgänge. Diesen wollen wir uns als nächstes zuwenden. Den Spuk heben wir uns etwas auf, zumal er ja auch erst einmal vorbei ist.

Blicke aus dem Fenster

Wenden wir uns zuerst den Erscheinungen zu, die sofort ins Auge fallen.
Dazu gehören zweifellos die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen sich die Dinge da draußen bewegen. Die nahen Gegenstände, z. B. Telegrafenmasten und Kilometersteine, fliegen geradezu vorüber, unser Blick kann sie kaum erfassen. Die Häuser und Bäume dagegen, die sich in größerer Entfernung vom Bahndamm befinden, ziehen nahezu gemächlich vorbei. Wie ist das möglich, da der Zug doch nur eine einzige Geschwindigkeit hat?
Folgende Tatsache ist doch unbestritten: Wären an unserem Zug – er bewegt sich in diesem Kapitel grundsätzlich mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Strecke – senkrecht zur Fahrtrichtung vorn und hinten zwei Stäbe angebracht, so würden alle Gegenstände die Entfernung *s* zwischen den Stäben in der gleichen Zeit zurücklegen, und zwar unabhängig von ihrer Entfernung vom Gleis (Abb. 2). Das bedeutet doch aber

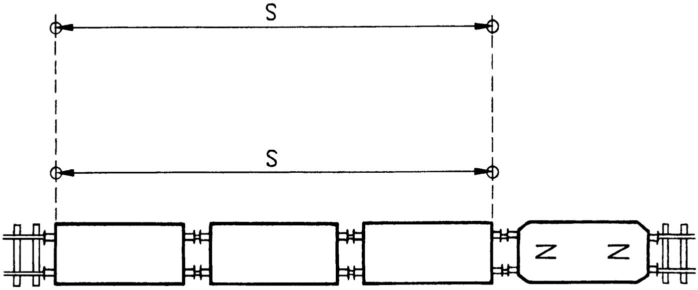


Abb. 2. Bestimmung von Geschwindigkeiten

nichts anderes, als daß nahe Dinge keine größere Geschwindigkeit haben als fernere.
Wir sehen es aber anders! Um das Problem lösen zu können, müssen wir eine Tatsache beachten, die oft übersehen wird: Unser Auge folgt den sich bewegenden Gegenständen. Dabei überstreicht es einen Winkel, den Sehwinkel φ (Abb. 3). In einer be-

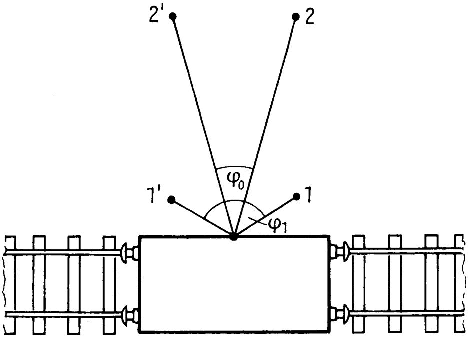


Abb. 3. Sehwinkel

stimmten Zeit bewegen sich die Gegenstände *1* und *2* in die Lagen *1'* und *2'*. Die zurückgelegten Strecken sind gleich. Die überstrichenen Sehwinkel jedoch unterscheiden sich. Der Sehwinkel für den nahen Gegenstand ist größer als der für den ferneren. Unser Auge muß sich beim Verfolgen des nahen Gegenstandes mehr drehen, als das beim ferneren Gegenstand der Fall ist. Deshalb haben wir den Eindruck, daß nahe Gegenstände schneller sind als fernere.
Wir wollen jetzt eine Gleichung für die Berechnung des Sehwinkels herleiten. Das ist mit Hilfe der trigonometrischen Funktionen nicht schwierig (Abb. 4). Wir nehmen an, daß sich der Körper in einer bestimmten Zeit von G nach G' bewegt. Dabei legt er die Strecke s zurück. Die Entfernung des Körpers vom Beobachter sei e. Dann kann man den Sehwinkel mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnen:

$$\tan\frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2}\,\frac{s}{e}.$$

Wir haben anhand der Abb. 2 gesehen, daß für eine bestimmte Zeitdifferenz die Strecke s konstant ist. Dann folgt aus der obigen Gleichung, daß der Sehwinkel um so größer ist, je kleiner die Entfernung des Körpers vom Gleis ist. Damit ist die weiter oben getroffene Aussage bestätigt.

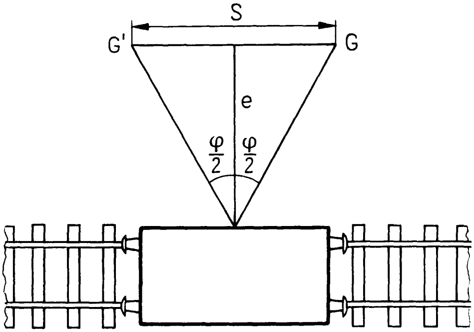


Abb. 4. Berechnung des Sehwinkels

Wir wollen ein Zahlenbeispiel anführen. Unser Zug habe eine Geschwindigkeit von $70\,\text{km}\cdot\text{h}^{-1} = 19{,}4\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wir wollen berechnen, wie groß der in 5 s überstrichene Sehwinkel ist, wenn der Körper 5 m bzw. 250 m vom Gleis entfernt ist. Aus der Beziehung $s = vt$ (Geschwindigkeit mal Zeit) folgt für $e = 5\,\text{m}$

$$\tan\frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2}\;\frac{19{,}4\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 5\,\text{s}}{5\,\text{m}} = 9{,}7\,.$$

Für φ ergibt sich daraus der bemerkenswerte Betrag von 168,2°.
Für den ferneren Gegenstand – $e = 250\,\text{m}$ – ergibt sich durch eine analoge Rechnung für den Sehwinkel φ nur ein Wert von 22,0°.
Damit ist die obige Aussage für dieses Beispiel bestätigt. Der Sehwinkel ist für nahe Gegenstände unter sonst gleichen Bedingungen deutlich größer als für fernere. Demzufolge bereitet bei fernen Gegenständen das Mitgehen des Auges keine Schwierigkeiten. Bei nahen Gegenständen hingegen ist es oft notwendig, die Bewegung des Auges durch ein Mitgehen des Kopfes zu unterstützen.
Der Eindruck der großen Schnelligkeit naher Körper wird ohne Zweifel noch dadurch unterstützt, daß in der Nähe viele Einzelheiten zu erkennen sind, die man an ferneren Gegenständen schon gar nicht mehr unterscheiden kann. Dazu kommt, daß man ferne Gegenstände viel länger „im Auge" hat als nahe (Abb. 5).
Wie kann man das Mitgehen der Augen unterbinden, da es ja zu falschen Aussagen führen kann? Ein Mittel dazu ist eine Verklei-

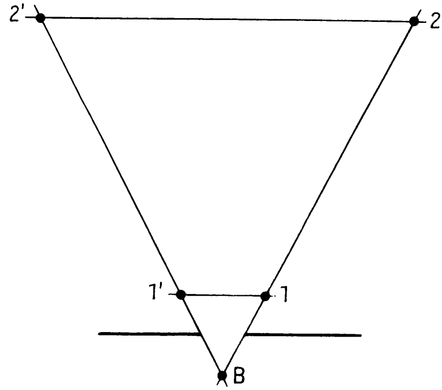


Abb. 5. Sichtdauer

nerung des Sehfeldes. Wie können wir das in unserem Zug mit einfachen Mitteln erreichen? Nun, wir nehmen eine Karte oder ein Blatt Papier und halten es in der Nähe einer senkrechten Fensterkante gegen die Scheibe des Fensters (Abb. 6). Der so geschaffene Spalt genügt schon. Wenn wir durch diesen Spalt hinausblicken, stellen wir fest, daß sich auch die fernen Objekte sehr rasch durch den Sehschlitz bewegen.

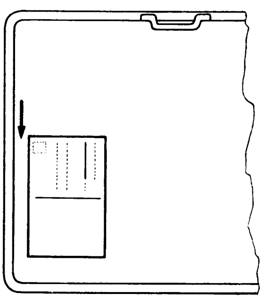


Abb. 6. Improvisierter Spalt

Jetzt wird ein Einwand laut: Wie können wir sagen, daß sich das Haus bewege, wo wir doch ganz genau wissen, daß das Haus feststeht! Wir bitten um etwas Geduld und versprechen, daß dieser Einwand bald erörtert werden wird.
Vorher jedoch wollen wir noch eine zweite interessante Erscheinung untersuchen, die uns auffiel, als wir aus dem Fenster sahen. Wir haben erkannt, daß sich alle Objekte der Umgebung parallel zum Zug entgegen der Fahrtrichtung des Zuges bewegen. Alle Gegenstände ohne Ausnahme! Aber was ist das? Die

fernen Baumgruppen fast am Horizont bewegen sich auch, aber mit dem Zug und nicht gegen seine Fahrtrichtung. Und das geschieht, obwohl sich weiter vorn befindende Objekte durchaus normal verhalten und sich in Richtung des letzten Wagens bewegen (Abb. 7). Wie ist das möglich? Aber es kommt noch schöner!

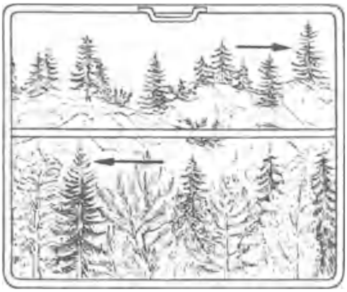


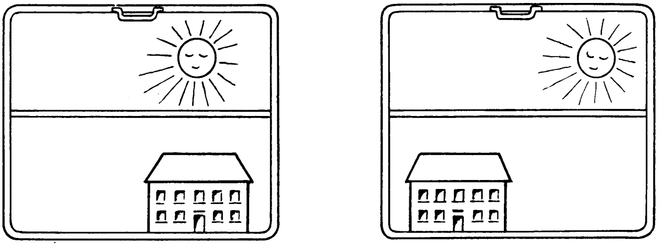
Abb. 7. Bewegung einer fernen Baumgruppe

Wenn man nämlich den Blick auf einen Baum jener sich nach vorn bewegenden Baumgruppe so konzentriert, daß man den Vordergrund nicht sieht, geschieht etwas Merkwürdiges. Der Baum bremst seine Vorwärtsbewegung ab, hält an und beginnt, sich der allgemeinen Rückwärtsbewegung anzuschließen – langsam, fast widerwillig. Man könnte den Eindruck gewinnen, daß man den Baum zur Ordnung gerufen habe und daß er, wenn auch ungern, gehorche.

Da wir wissen, daß einem Baum kein eigener Wille zuzuschreiben ist, müssen wir nach einer anderen Erklärung suchen. Wir müssen nicht weit gehen. Wir kennen sie schon. Auch hier ist das Mitgehen des Auges die Ursache. Das Auge folgt der etwas näheren Gruppe von Gegenständen, weil sie mehr auffällt als die ferne. Dadurch ist aber nicht mehr der Zug, sondern die vordere Gruppe der Bezugspunkt. In bezug auf diesen bewegt sich die fernere Gruppe verzögert nach hinten. Uns scheint es, als bewege sie sich nach vorn. Das Ausschalten dieses Bezugspunktes durch Konzentration auf die ferne Gruppe hat zur Folge, daß sich auch die fernen Bäume wieder „normal" bewegen.

Ähnliche Beobachtungen, wie wir sie bis jetzt in diesem Kapitel angestellt haben, kann man auch bei Fahrten in der Dunkelheit machen. Man muß in einem solchen Falle nur die Häuser, Bäume, Masten usw. ersetzen durch die Lampen, die an vielen Stellen des Geländes leuchten. Manchmal sind die Beobachtungen in der Dunkelheit sogar eindeutiger, weil nicht so viele Objekte zu beobachten sind wie am Tage.

Also bewegen sich nun alle Gegenstände der Außenwelt entgegen der Fahrtrichtung des Zuges? Die Antwort lautet wider Erwarten „Nein". Ein Objekt, das an dieser Bewegung nicht teilnimmt, ist die Sonne! Haben wir sie erst einmal in unserem Sehschlitz eingefangen oder auf andere Art und Weise an der senkrechten Fensterkante arretiert, so bleibt sie dort, wie schnell sich auch alle anderen Dinge bewegen mögen (Abb. 8). (Es sei



a) b)

Abb. 8. Die Sonne läuft nicht mit

daran erinnert, daß sich unser Zug geradlinig bewegt.) Ist das wieder nur eine Täuschung? Hier liegen die Dinge anders, wie uns die Gleichung für den Sehwinkel zeigen wird. Die Entfernung der Sonne von unserem Zug ist natürlich viel, viel größer als die Entfernung aller irdischen Objekte. Die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde beträgt bekanntlich 150 Mill. km. Also ist e gleich $1{,}5 \cdot 10^8$ km. Es ist schon zu vermuten, daß entsprechend der Gleichung für den Sehwinkel wegen des großen e für φ nur ein sehr kleiner Wert herauskommt. Um die Bedingungen für ein meßbares φ zu begünstigen, wählen wir eine relativ große Zeit – statt 5 Sekunden 5 Minuten – und eine relativ große Geschwindigkeit – statt 70 km $\cdot$ h^{-1} 120 km $\cdot$ h^{-1} –. Trotz alledem ergibt sich für den Sehwinkel nur ein Wert von $3{,}8 \cdot 10^{-6}$ Grad. Das sind bekanntlich 0,000 003 8°. Ein solch kleiner Winkel ist aber für uns im Zug nicht feststellbar. Damit behält für uns die Sonne ihre Richtung und damit ihren Platz am Himmel bei.

Nun könnte man sich Abhilfe durch eine Verlängerung der Meßzeit erhoffen. Aber das wäre ein Trugschluß. Denn abgesehen davon, daß sich der Sehwinkel auch nach 5 h erst um 0,000 2° verändert haben würde, hätte sich in diesem Zeitraum die Sonne längst infolge der Erdrotation aus dem Spalt bewegt. Denn infolge dieser Drehung der Erde um ihre Achse würde die Sonne

im Verlaufe von 5 h an der Himmelskugel einen Winkel von 75° überstreichen. Das ist fast ein Viertelkreis! Was ist dagegen ein Spalt!
Nachts gibt es viele Objekte, die an der Rückwärtsbewegung nicht teilnehmen. Das sind die Planeten und die Fixsterne mit ihren riesigen Entfernungen von der Erde, und das ist auch unser guter, alter Mond. Seine Entfernung von der Erde beträgt zwar nur 380 000 km, aber auch bei ihm würde sich nach 5 min mit 0,001 5° eine viel zu kleine Veränderung des Sehwinkels einstellen, als daß wir sie als Richtungsänderung feststellen könnten.
Die Außerirdischen machen sich bemerkbar!
Es kann aber auch sein, daß Sonne oder Mond ganz plötzlich aus unserem Sehschlitz verschwindet. Was ist in einem solchen Fall geschehen? Ganz einfach, der Zug ist durch eine Kurve gefahren. Aber mit Problemen der Kurvenfahrt beschäftigen wir uns erst in einem späteren Kapitel.
Noch ist der Einwand nicht untersucht, daß sich die Dinge da draußen, die Häuser und Bäume, doch nicht bewegen, sondern daß sie feststehen würden. Das war doch genau der Grund dafür, daß das Kind belächelt wurde, als es einen sich in Bewegung setzenden Bahnhof feststellte.
Um den Dingen auf den Grund zu gehen und um diesen Einwand zu entkräften, benötigen wir jetzt den wichtigen Begriff „Bezugssystem". Es ist nämlich eine gesicherte Erkenntnis der Physik, daß eine Absolutgeschwindigkeit eines Körpers auf keine Art und Weise bestimmbar ist, sondern daß sich Geschwindigkeiten immer nur relativ zu anderen Körpern messen lassen. Man benötigt also Bezugssysteme, auf die man die Bewegung eines Körpers beziehen kann.
Eine mögliche Definition des Begriffs „Bezugssystem" könnte lauten: Ein Bezugssystem ist eine starre Anordnung materieller Körper mit einer Uhr.
Diese Definition enthält zwei wichtige Hinweise. Ein Bezugssystem ist ein starrer Körper oder eine starre Anordnung von solchen Körpern. Bezugssysteme existieren also objektiv, also außerhalb und unabhängig von unserem Bewußtsein. Als Bezugssystem kann prinzipiell jeder materielle Körper genommen werden. Für die Themen in diesem Kapitel benutzen wir als Bezugssysteme vor allem die Erde – vertreten durch das Gleis – und unseren Zug.
Wozu aber die Uhr? Nun, um Bewegungen feststellen zu können, muß man die zeitliche Veränderung des Ortes der Körper

untersuchen. Man muß also die Zeit messen. Dazu braucht man eine Uhr. Zur Festlegung eines reproduzierbaren und unveränderlichen Zeitmaßes braucht man streng periodische Vorgänge. Als sehr genau haben sich die Frequenzen bestimmter Strahlungen erwiesen. Die darauf beruhenden Atomuhren haben in 1 Mill. Jahren eine Abweichung von 1 s. Wer vermag sich das schon vorzustellen!

Um die Ortsveränderungen quantitativ erfassen zu können, verbindet man das Bezugssystem mit einem Koordinatensystem (Abb. 9). Im Gegensatz zum Bezugssystem ist das Koordinatensystem eine gedankliche Konstruktion. Es ist also nicht materiell.

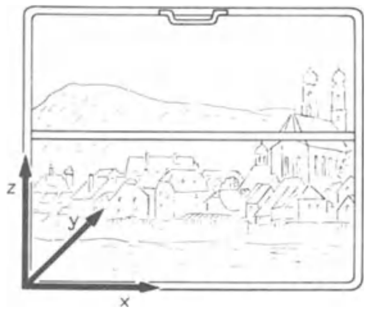


Abb. 9. Bezugssysteme

In bezug auf ein Koordinatensystem bekommt ein Körper Koordinaten zugeordnet, die seine Lage im System eineindeutig beschreiben. Verändert sich mindestens eine der Koordinaten zeitlich, so wird man sagen, daß sich der Körper in bezug auf dieses System bewegt. Es ist in diesem Sinne korrekt zu sagen: „Das Haus bewegt sich in bezug auf das Bezugssystem ‚Zug'." (Abb. 10)

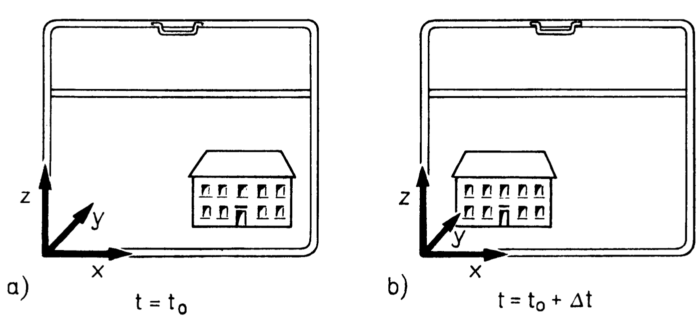


Abb. 10. Das Haus bewegt sich

Das Kind hatte recht mit seiner Bemerkung, daß der Bahnhof abfährt. Denn ein Kind identifiziert sich völlig mit seiner Umgebung. Es lebt im neuen Bezugssystem. Für das Kind ist das Hineindenken in die neue Welt völlig problemlos. Uns Erwachsenen bereitet das Schwierigkeiten. Das bewies unser Lächeln über das Kind. Wir sind schon zu sehr geprägt vom Bezugssystem „Erde".
Niemand wird von dem Kind erwarten, daß es seinem Ausruf hinzufügt: „in bezug auf den Zug". Das Kind ist in dem glücklichen Alter, in dem alles solid und fest ist. Bezugssysteme haben in seiner Welt noch keinen Platz.
Wie schwer Erwachsenen das Hineindenken in ein anderes Bezugssystem fällt, wird wohl am deutlichsten veranschaulicht durch den jahrhundertelangen Kampf um die Durchsetzung des wahren Weltbildes. Daß sich das geozentrische Weltbild, das die Erde bekanntlich in den Mittelpunkt der Welt setzt, so lange halten konnte, ist auch der Tatsache zuzuschreiben, daß vom Bezugssystem „Erde" aus dieses Weltbild am einsichtigsten war. Wer sieht schon, daß sich die Erde dreht und daß sie durch den Weltenraum eilt? Tag für Tag hingegen kann man beobachten, wie die Sonne auf- und untergeht und wie sie sich auf ihrer Bahn von Ost nach West bewegt.

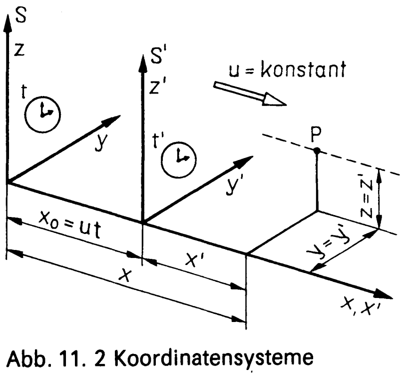


Abb. 11. 2 Koordinatensysteme

Gehen wir jetzt zu quantitativen Aussagen über. Dazu benötigen wir Gleichungen (Abb. 11). Wir suchen die Beziehungen zwischen den Koordinaten (x, y, z), die der Punkt P im System S hat, und seinen Koordinaten (x', y', z') im System S'. Da wir zur Beschreibung der uns jetzt interessierenden Vorgänge Koordinatensysteme brauchen, die sich im Verhältnis zueinander bewe-

gen, nehmen wir an, daß sich das System S' gegen das System S gleichförmig und geradlinig bewege. Zur Vereinfachung nehmen wir weiter an, daß diese Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung der x-Achse so erfolgt, daß die y- und die z-Achse ihre Richtung beibehalten. S könnte das mit dem Gleis und damit mit der Erde verbundene System sein, während S' das mit dem Zug verbundene darstellen könnte.
Aus Abb. 11 kann man die folgenden Beziehungen entnehmen, die uns ein tiefes Eindringen in die Problematik ermöglichen werden:

$$x = x' + ut; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = t'.$$

Die Gleichungen werden als Galilei-Transformation bezeichnet. Jetzt sollen die Gleichungen der Galilei-Transformation interpretiert werden.
Die Gleichung $x = x' + ut$ beschreibt die Beziehung, die zwischen den x-Koordinaten des Punktes P in den beiden Systemen S und S' besteht.
Die Gleichungen $y = y'$ und $z = z'$ sind eine Folge der Annahme, daß sich das System S' nur in x-Richtung bewegt.
Schließlich besagt die Gleichung $t = t'$, daß in beiden Systemen die gleiche Zeit gilt. Das ist eine Bemerkung, die bis zum Beginn unseres Jahrhunderts als trivial galt, weil man von einer absoluten, von den Systemen unabhängigen Zeit ausging. Wir werden uns dieser Problematik an späterer Stelle noch einmal zuzuwenden haben.
Um tiefer in die Probleme eindringen zu können, erinnern wir an zwei Ergebnisse der Differentialrechnung. Die Ableitungen des Weges nach der Zeit haben eine physikalische Bedeutung. Die erste Ableitung ist die Momentangeschwindigkeit, die zweite Ableitung des Weges beschreibt die Momentanbeschleunigung. Geschwindigkeiten werden bekanntlich mit v und Beschleunigungen mit a bezeichnet.
Wir erinnern auch an den Begriff „Inertialsystem". Das ist ein System, in dem die Newtonschen Axiome der Mechanik, also das Trägheitsgesetz, das Grundgesetz $F = ma$ und das Prinzip „actio gleich reactio", gelten.
Nach diesen Vorbemerkungen wenden wir uns erneut der Gleichung $x = x' + ut$ zu. Unter Beachtung, daß u konstant ist, erhält man durch Differentiation die wichtige Beziehung

$$v = v' + u.$$

Diese Gleichung, die auch als Newtonsches oder klassisches Additionstheorem der Geschwindigkeiten bezeichnet wird, beschreibt den Zusammenhang der Geschwindigkeiten, die ein Körper in den beiden Systemen S und S' hat, wenn sich diese Systeme mit der Geschwindigkeit u gegeneinander bewegen. Schon der verwendete Plural des Wortes Geschwindigkeit weist darauf hin, daß ein und derselbe Körper in bezug auf verschiedene Systeme durchaus unterschiedliche Geschwindigkeiten haben kann.

Ein Körper, der in S in Ruhe ist, etwa unser Bahnhof, kann sich in bezug auf S' durchaus bewegen. Denn aus $v = 0$ folgt nach dem Additionstheorem $v' = -u$. Das heißt, daß sich ein Körper, der in S in Ruhe ist, in S' mit einer Geschwindigkeit bewegt, die der Relativgeschwindigkeit der Systeme dem Betrage nach gleich, jedoch entgegengerichtet ist. Also bewegen sich doch alle irdischen Körper vor unserem Abteilfenster gleich schnell nach hinten. Diese Aussage stimmt natürlich nur dann, wenn u nicht 0 ist. Wenn der Zug hält, bewegen sich Körper, die in S in Ruhe sind, in S' auch nicht. Wenn der Zug hält, fährt der Bahnhof nicht ab!

Nun wollen wir die Frage beantworten, unter welcher Bedingung ein Körper im System S' in Ruhe ist. Aus dem Theorem folgt, daß v' unter der Bedingung gleich Null ist, daß $v = u$ gilt. Was bedeutet das? Ein Körper, der sich in bezug auf das ruhende System S mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Relativgeschwindigkeit der Systeme bewegt, ist im bewegten System in Ruhe. Das klingt kompliziert, ist es aber nicht.

Für unser gewähltes Beispiel heißt das nichts anderes, als daß ein Auto, das sich mit der Geschwindigkeit des Zuges auf einer Straße parallel zum Bahnkörper bewegt, seine Position vor dem Fenster nicht verändert. Es bleibt auf gleicher Höhe, es folgt uns, es ist im System „Zug" in Ruhe. Aber auch wir sind doch in diesem System in Ruhe, wenn wir unseren Platz beibehalten. Das ist doch keinerlei Widerspruch. Denn wenn wir auf unserem Platz sitzenbleiben, haben wir doch im System „Erde" die Geschwindigkeit des Zuges. Also gilt für uns $v = u$, womit wir die Bedingungen dafür erfüllt haben, in S' in Ruhe zu sein.

Allmählich wird deutlich, welch große Bedeutung Bezugssysteme für die Entscheidung der Frage haben, ob sich ein Körper bewegt oder nicht. Aber nicht nur zur Beantwortung der Frage, *ob* sich ein Körper bewegt, sondern auch der Frage, *wie* er sich bewegt, bedarf es der Bezugssysteme. Nehmen wir den Fall, daß ein Gegenstand aus dem Fenster eines fahrenden Zuges fällt

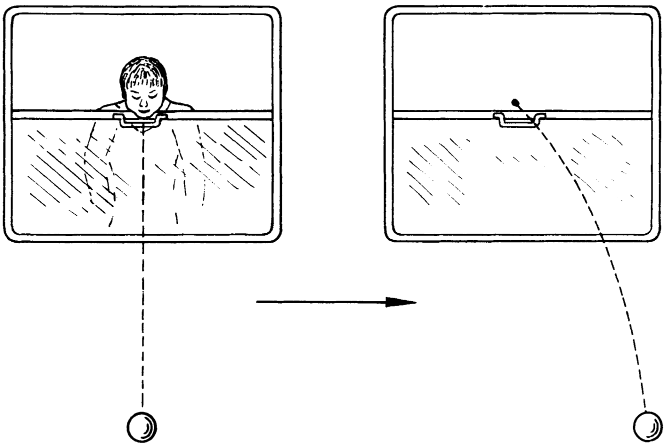


Abb. 12. Ein Körper fällt

(Abb. 12). Je nach dem Bezugssystem wird die Bahnkurve unterschiedlich beschrieben werden. Der Beobachter *1* im System S' wird sagen, daß der Gegenstand auf einer Geraden senkrecht nach unten fällt. Dagegen wird der Beobachter *2* im System S die Bahnkurve als Parabel beschreiben. Auch in diesem Fall ist die Frage danach, welcher Beobachter recht hat, gegenstandslos. Beide Beobachter beschreiben die Bahn in ihrem System richtig. Der Körper bewegt sich eben im System S' längs einer Geraden, während er sich gleichzeitig im System S längs einer Parabel bewegt.
Um die Kräfte in unsere Überlegungen einzubeziehen, differenzieren wir die Gleichung $x = x' + ut$ ein zweites Mal. Wir erhalten

$$a = a'.$$

Das bedeutet, daß die Beschleunigungen in beiden Systemen die gleichen sind. Das hat weitreichende Folgen. Wenn wir nämlich annehmen, daß das System S ein Inertialsystem ist, in dem also $F = ma$ gilt, so ist auch S' ein Inertialsystem. Denn es gilt $F = ma' = F'$.
Verallgemeinert man diese Ergebnisse, so kann man feststellen: In allen Labors, die sich im Verhältnis zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen, verläuft die Bewegung nach den gleichen Gesetzen.

Alle Systeme, die sich gleichförmig und geradlinig zu einem Inertialsystem bewegen, sind auch Inertialsysteme.
Man kann sich also in einem schnellfahrenden Zug genauso sicher Kaffee eingießen wie in einem stehenden Zug. Wichtig dabei ist nur, daß die Geschwindigkeit des Zuges nach Betrag und Richtung konstant bleibt. Die Frage, wie groß die Geschwindigkeit ist, spielt dabei keine Rolle.
In einem früheren Kapitel hatten wir die Frage gestellt, ob man schneller sein könne als ein Schnellzug. Nichts einfacher als das! Man braucht nur mit der Geschwindigkeit v' im Schnellzug nach vorn zu laufen. Dann hat man in bezug auf die Erde die Geschwindigkeit $v = v' + u$. Und diese ist größer als die Geschwindigkeit des Schnellzuges, die ja gleich u ist.
Fast eine Binsenweisheit! Und doch gibt es mit dem Newtonschen Additionstheorem der Geschwindigkeiten sofort Probleme, wenn man sich der Vakuumlichtgeschwindigkeit nähert, von der wir wissen, daß sie etwa $300\,000\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$ beträgt. Wenn wir nämlich unseren Zug mit Lichtgeschwindigkeit fahren lassen und uns dann noch in ihm nach vorn bewegen, so sind wir nach dem Theorem schneller als das Licht!!! Daß das nicht geht, wissen wir. Wo aber liegt der Fehler?
Die Lichtgeschwindigkeit, genauer gesagt ihre absolute Konstanz, brachte die Physiker des ausgehenden 19. Jahrhunderts in arge Nöte.
Zum Beispiel hätte das Licht in einem gleichförmig fahrenden Zug länger brauchen müssen, um vom hinteren Ende zur Lokomotive zu gelangen, als in einem stehenden, denn im fahrenden Zug hätte ja das Licht nach dem Additionstheorem nur die Relativgeschwindigkeit $c - u$ erreicht, weil die Lokomotive dem Licht gewissermaßen davonfährt. Da aber der Zug und die Erde Inertialsysteme sind, können im fahrenden Zug keine anderen Bewegungsgesetze gelten als im stehenden.
Als alle Versuche fehlschlugen, die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit des jeweiligen Inertialsystems nachzuweisen, entstand um die Jahrhundertwende eine problematische Situation in der Physik, die von manchen sogar als Krise bezeichnet wurde.
Den Ausweg wies der geniale Einstein. In seiner 1905 erstmals veröffentlichten Speziellen Relativitätstheorie erhob er die Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit c in allen Inertialsystemen unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters zum Postulat. Einstein erkannte weiter, daß für den Übergang von einem Inertialsystem zu einem anderen nicht die

Galilei-Transformation, sondern die Lorentz-Transformation gilt:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - x\frac{u}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

Von Einstein stammt auch das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v'u}{c^2}}.$$

Betrachtet man diese Gleichungen, so erkennt man, daß für Geschwindigkeiten v und u, die sehr viel kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c sind, die „Korrekturglieder" $u^2 : c^2$ bzw. $v'u/c^2$ gegen Null gehen und die klassischen Formen der Gleichungen entstehen. Insofern enthält die Spezielle Relativitätstheorie die Newtonsche Mechanik als Spezialfall.
Die Frage, ob die Spezielle Relativitätstheorie im fahrenden Zuge gilt, läßt sich jetzt so beantworten: Ja, sie gilt, wenn sich der Zug gleichförmig geradlinig bewegt.
Aus diesen Ansätzen der Speziellen Relativitätstheorie folgt, daß die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit in dem Sinne ist, daß es keine Lichtausbreitung, keine Übertragung von Signalen und keine Bewegung von Körpern mit Geschwindigkeiten gibt, die größer als c sind.
Die vierte Gleichung der Lorentz-Transformation enthält die wahrscheinlich einschneidendste Erkenntnis Einsteins. Jahrtausendelang waren Wissenschaftler und Philosophen davon überzeugt, daß die Zeit eine absolute Größe ist. Auch Newton nahm eine absolute, d. h. unabhängig von der Materie und deren Veränderungen gleichmäßig verfließende Zeit an mit einer eindeutigen Früher-später-Relation.
Einstein erkannte, daß die Zeit relativ ist und daß sie vom jeweiligen Bezugssystem abhängt. Wie man die Zeiten zweier Inertialsysteme ineinander umrechnen kann, zeigt die vierte Gleichung der Lorentz-Transformation. Diese Erkenntnis Einsteins, die er 1905 veröffentlichte, revolutionierte die Physik. Diese Ergebnisse waren so unwahrscheinlich, daß es lange dauerte, bis sie sich durchsetzten. Erschwerend kam ja hinzu, daß sie zu einer Zeit veröffentlicht wurden, in der keine Möglichkeit ihrer experi-

mentellen Überprüfung bestand. Heute ist die Spezielle Relativitätstheorie auch experimentell abgesichert.
Zur Beruhigung des Lesers sei darauf verwiesen, daß durch die Spezielle Relativitätstheorie weder die Reihenfolge der Ereignisse noch die Kausalität angetastet werden. Die Zeit läuft niemals rückwärts.
Fast ist es schade, jetzt nicht tiefer in die Relativitätstheorie eindringen zu können. Das aber würde das Thema sprengen.
Zum Abschluß müssen wir aber noch auf zwei Fragen eingehen, die im Verlaufe unserer Überlegungen entstanden waren.
Der Widerspruch zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme wird gelöst durch die Erkenntnis, daß die Zeit relativ ist, daß im fahrenden Zug eine andere Eigenzeit gilt als im stehenden.
Es gab noch ein Problem. Das war die Frage, ob man schneller als das Licht sein könne, indem man in einem mit Lichtgeschwindigkeit fahrenden Zug nach vorn geht. Die Antwort liefert auch diesmal die Spezielle Relativitätstheorie. Man darf in einem solchen Fall nicht das klassische Additionstheorem der Geschwindigkeiten benutzen, sondern man muß sein relativistisches Pendant anwenden.
Zu diesem Theorem sollen jetzt wenige einfache Beispiele angeführt werden.
Zuerst ein Fall, für dessen Behandlung die klassische Physik eigentlich ausreichen würde. Aber wir sind neugierig geworden und wollen wissen, wie groß oder besser wie klein der Einfluß der Relativitätstheorie bei Geschwindigkeiten ist, die weit unter der Lichtgeschwindigkeit liegen. Nehmen wir deshalb einmal an, daß die Relativgeschwindigkeit der Bezugssysteme $u = 1\,000\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} \approx 277{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ ist und daß sich im System S' ein Körper mit der Geschwindigkeit $v' = 150\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} \approx 41{,}7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ bewegt. Dann bewegt sich dieser Körper, wie wir gesehen haben, in bezug auf S nach klassischen Auffassungen mit der Geschwindigkeit $v = v' + u = 319{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \approx 1\,150\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$. Welche Geschwindigkeit ergibt sich nun, wenn man das relativistische Additionstheorem anwendet? Man erhält ebenfalls $319{,}5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, wenn man einen Taschenrechner verwendet. Man hätte also die Relativitätstheorie nicht bemühen müssen. Das folgt auch aus der Tatsache, daß das relativistische Korrekturglied $v'\ u/c^2$ in diesem Falle gleich $1{,}287\,14 \cdot 10^{-13} = 0{,}000\,000\,000\,000\,128\,714$ ist. Ein solch kleines Korrekturglied hat für unsere Fragestellung keinerlei Bedeutung.
Anders liegen die Dinge schon, wenn man Geschwindigkeiten

betrachtet, die der Vakuumlichtgeschwindigkeit nahekommen. Nehmen wir einmal an, daß $u = 0{,}8c$ und $v' = 0{,}7c$ seien. Das sind immerhin Geschwindigkeiten von $240\,000\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$ bzw. $210\,000\,\mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Wie groß ist nun die Geschwindigkeit v? Das klassische Theorem liefert $v = 1{,}5c$, also ein Vielfaches der Lichtgeschwindigkeit. Wir wissen, daß dieses Ergebnis falsch sein muß, da die Lichtgeschwindigkeit eine obere Grenze für alle Geschwindigkeiten darstellt. Mit Mitteln der Newtonschen Physik ist dieses Problem nicht zu lösen.
Nach Einstein erhält man für v einen anderen Wert:

$$v = \frac{0{,}7c + 0{,}8c}{1 + \frac{0{,}7c \cdot 0{,}8c}{c^2}} = \frac{1{,}5}{1{,}56}c = \underline{\underline{0{,}96\,c}}.$$

Der Unterschied ist deutlich. Bei Anwendung des relativistischen Additionstheorems erhält man für Geschwindigkeiten, die kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind, als resultierende Geschwindigkeit immer einen Wert unterhalb der Lichtgeschwindigkeit.
Was geschieht nun aber, wenn eine oder mehrere Komponenten gleich c sind? Dann erhält man als Ergebnis die Lichtgeschwindigkeit c. Das zeigt die folgende Rechnung für $u = v' = c$:

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{cc}{c^2}} = \frac{2c}{2} = \underline{\underline{c}}.$$

Unbemerkt führte uns die Fahrt mit einem ganz normalen Zug an die Grenzen der klassischen Physik. Wir konnten einen winzigen Blick in die interessante Welt der relativistischen Physik werfen. Hoffentlich hat er zu weiterem Studium angeregt. Daß wir von einem Zug aus auf diese Probleme stießen, ist nicht verwunderlich. Denn wenn man in einem Zug fährt – geradlinig und gleichförmig, versteht sich –, befindet man sich in einem Inertialsystem. Und der Blick aus dem Fenster ist der Blick in ein anderes Inertialsystem. Und die Beziehungen zwischen Inertialsystemen, die sich gegeneinander bewegen, wurden ja gerade von der Speziellen Relativitätstheorie aufgedeckt.
Noch ein Wort zu Newton. Wenn wir auch aus der Sicht der relativistischen Physik in diesem Kapitel an mehreren Stellen feststellen mußten, daß Newtons Ergebnisse nicht ausreichten und

daß die klassische Physik in gewisser Weise nur einen Spezialfall der Relativitätstheorie für Geschwindigkeiten darstellt, die viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind, so ist doch Newtons Verdienst für die Entwicklung der Physik unbestritten. Newton lebte von 1643 bis 1727. In dieser Zeit ein abgeschlossenes Gebäude der Mechanik geschaffen zu haben, das bis zum Beginn unseres Jahrhunderts uneingeschränkt galt und das auch heute noch für die menschliche Praxis enorme Bedeutung hat – das ist Newtons unsterbliche Leistung.
Die Größe der Leistung Newtons wird deutlicher, wenn man bedenkt, daß zu seiner Zeit Segelschiff und Pferdewagen die dominierenden Transportmittel waren, daß die Dampfmaschine erst etwa 100 Jahre später erfunden werden sollte und daß es sogar noch nicht einmal eine Petroleumlampe gab. In einer solchen Praxisumgebung eine Theorie zu schaffen, die noch 300 Jahre später mit Erfolg angewandt wird und nach der ungezählte junge Menschen ihre ersten Schritte in die Physik tun, verlangt die Denkkraft eines Genies. Newton war der Einstein seiner Zeit.
Auch wir kehren jetzt zu Newton zurück.

Erstaunliche Kräfte im Zug

Im vorletzten Kapitel hatten wir während des Abfahrens im Zug merkwürdige Vorgänge beobachten können. Erinnern wir uns: Das Ei hatte plötzlich zu rollen begonnen. Eine Pendeltür hatte sich ganz von selbst geöffnet. Ein Reisender hatte nur unter Schwierigkeiten nach vorn gehen können usw. Dann hatten diese erstaunlichen Vorgänge aufgehört, und alles war wieder normal verlaufen.
Nun ist eine Erklärung dieser Vorgänge fällig. Das gilt um so mehr, als sie jetzt, da sich der Zug der nächsten Station nähert, erneut auftreten. Allerdings laufen sie jetzt in entgegengesetzter Richtung ab. Wir werden nicht ins Polster, sondern nach vorn gedrückt. Das Ei rollt nach der anderen Seite vom Tisch. Oberfläche der Limonade und Pendel stellen sich in die andere Richtung ein. Und der Reisende, der nach vorn gehen will, hat keinen Widerstand mehr zu überwinden, sondern wird regelrecht nach vorn getrieben.

Wir kommen der Erklärung etwas näher, wenn wir feststellen, daß sich diese sonderbaren Begebenheiten immer dann ereignen, wenn sich die Geschwindigkeit des Zuges ändert. Das ist eigentlich schon die Lösung.
Denn ein Zug, der in Ruhe ist oder der gleichförmig geradeaus fährt, stellt aus physikalischer Sicht ein Inertialsystem dar. In einem solchen System gelten, wie wir gesehen haben, die Newtonschen Axiome der Mechanik. Also gilt auch das Grundgesetz $F = ma$. Dieses Gesetz besagt u. a., daß es keine Beschleunigung a, also keine Veränderung des Bewegungszustandes eines Körpers geben kann, wenn keine Kraft auf den Körper wirkt. Solche erstaunlichen Ereignisse wie das plötzliche Wegrollen des Eis sind in einem Inertialsystem undenkbar.
Während des Anfahrens und des Bremsens aber befinden wir uns nicht in einem Inertialsystem, sondern in einem beschleunigten Bezugssystem, einem Nichtinertialsystem. Das ist deshalb so, weil die Geschwindigkeit wächst bzw. fällt.
Wir befinden uns also in einem beschleunigten System. Die Beschleunigung, sie wird i. allg. mit dem Buchstaben a bezeichnet, ist eine physikalische Größe, die die Änderung von Geschwindigkeiten beschreibt. Sie zeigt in Richtung der Änderung der Geschwindigkeit. Zum Beispiel zeigt bei einem anfahrenden Zug die Beschleunigung in Richtung der Lokomotive, beim Bremsen in Richtung des letzten Wagens. Da sie eine Richtung hat, ist die Beschleunigung – wie auch die Geschwindigkeit – eine vektorielle Größe. Ihre Einheit ist $m \cdot s^{-2}$. Zur Veranschaulichung wollen wir ein Zahlenbeispiel betrachten. Wenn ein Zug mit einer Beschleunigung von $0{,}12\,m \cdot s^{-2}$ fährt, so bedeutet das, daß sich die Geschwindigkeit des Zuges in jeder Sekunde um $0{,}12\,m \cdot s^{-1}$ erhöht. Bei negativen Beschleunigungen verringert sich die Geschwindigkeit entsprechend.
In beschleunigten Bezugssystemen gelten die Newtonschen Axiome nicht. Das Ei ist der beste Beweis dafür. Es beginnt zu rollen, ohne daß eine Kraft auf das Ei wirkt. Ein offenkundiger Verstoß gegen das Trägheitsgesetz, das in einem solchen Fall das Beibehalten des Ruhezustandes fordert.
In beschleunigten Bezugssystemen gibt es Kräfte, die ohne erkennbare Wechselwirkung auftreten und die es in Inertialsystemen nicht gibt. Solche Kräfte nennt man Trägheitskräfte. Sie sollen mit F_T bezeichnet werden. Die Trägheitskräfte sind den Kräften, die das System beschleunigen, entgegengesetzt gleich. Beim Anfahren eines Fahrzeugs wirken sie nach hinten, beim Bremsen nach vorn (Abb. 13).

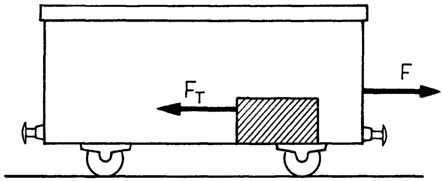


Abb. 13. Trägheitskraft

Diese Trägheitskräfte sind es, die die bemerkenswerten Vorgänge verursachen, die wir in Beschleunigungsphasen unseres Zuges beobachten konnten. Durch sie werden wir beim Anfahren in das Polster gedrückt, wenn wir in Fahrtrichtung sitzen. Durch sie rollt das Ei in dieser Phase nach hinten weg und öffnet sich die Pendeltür nach der Seite, die dem Ende des Zuges zugewandt ist (Abb. 14). Ähnlich verhält sich auch unser Pendel.

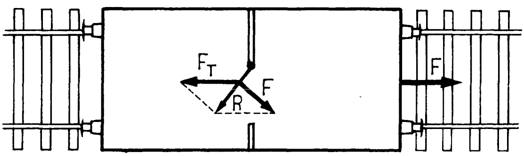


Abb. 14. Pendeltür im Zug

Um die Vorgänge richtig zu beschreiben, darf man nicht außer acht lassen, daß in unserem Fahrzeug außer den Trägheitskräften auch noch andere Kräfte, wie Gewichts- und elastische Kräfte, wirken. So bleibt das Pendel in der Lage stehen, in der die Resultierende aus Trägheits- und Gewichtskraft in Richtung des Fadens zeigt (Abb. 15). Man erkennt an Abb. 15, daß man an der Schrägstellung des Pendels die Größe der Beschleunigung ablesen könnte. Die Pendeltür wird sich so weit öffnen, daß die

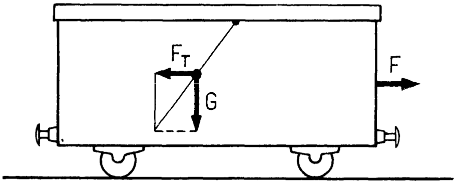


Abb. 15. Pendel im anfahrenden Zug

Resultierende aus der Trägheitskraft und den elastischen Kräften der Türfeder in Richtung der Tür zeigt (Abb. 14).
Wie ist das mit der Oberfläche der Limonade in unserer Flasche? Die Oberfläche einer Flüssigkeit stellt sich immer senkrecht zur Resultierenden aller Kräfte ein. Das ist eine Folge der gegenseitigen Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsteilchen. Im Falle des Wirkens von Trägheitskräften muß sich deshalb die Oberfläche einer Flüssigkeit schräg stellen (Abb. 16).

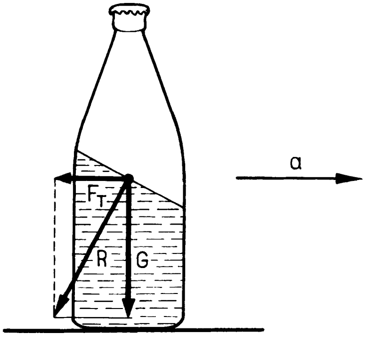


Abb. 16. Flüssigkeit im beschleunigten System

Und warum ist es nicht so einfach, in Beschleunigungsphasen Kaffee einzugießen? Die Ursache für die entstehenden Schwierigkeiten sind wiederum die Trägheitskräfte. Denn sie deformieren die in Inertialsystemen übliche Parabel der ausfließenden Flüssigkeit (Abb. 17).

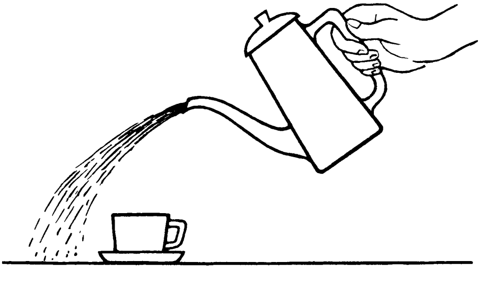


Abb. 17. Eingießen im beschleunigten System

Damit sind die merkwürdigen Vorgänge erklärt, die in beschleunigten Fahrzeugen zu beobachten sind. Ihre Ursache haben alle diese Ereignisse in den Trägheitskräften, die in beschleunigten Bezugssystemen auftreten.

Wir können diese Trägheitskräfte auch als Indikatoren benutzen. Stellen wir uns einmal vor, wir befänden uns in einem völlig abgeschlossenen Inertialsystem. Das könnte ein idealer Zug sein, der völlig erschütterungsfrei, geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit fährt und dessen Fenster verhängt sind. Wir befänden uns in einer unangenehmen Situation. Denn wir könnten auf keine Art und Weise feststellen, ob wir uns überhaupt bewegen in bezug auf die Erde. Wir könnten auch nichts darüber aussagen, wie schnell wir sind.
Wie froh wären wir in einer solchen Lage, wenn wir plötzlich Trägheitskräfte bemerken würden. Veränderungen, wie sie auf den Abb. 14 bis 16 dargestellt sind, wären ein sicheres Zeichen dafür, daß unser System beschleunigt wird. Wir könnten auch etwas aussagen über die Richtung der Beschleunigung, ja sogar über ihren Betrag. Allerdings könnten wir nichts darüber aussagen, ob wir schneller oder langsamer werden, weil wir ja auch die Richtung unserer Geschwindigkeit nicht kennen.
In einer ähnlich prekären Situation befände sich die Menschheit, wenn die Erde ständig von einer dichten Wolkendecke umgeben wäre, so daß kein Blickkontakt mit anderen Himmelskörpern möglich wäre. Unsere Erkenntnisse über die Bewegung der Erde wären mit großer Wahrscheinlichkeit unvollständig, ganz zu schweigen von dem Grad unserer Erkenntnisse über das Weltall. Denn erst das Studium der Bewegungen der Sterne im System „Erde" hat uns die Bewegungen erkennen lassen, die unsere Erde ausführt. Natürlich gibt es heute außer dem Licht noch andere Strahlungen, mit denen die Astronomen Kontakt mit anderen Himmelskörpern herstellen, Strahlungen, die unabhängig von der Wolkendecke sind. In der Geschichte der Herausbildung des wissenschaftlichen Weltbildes jedoch spielt das sichtbare Licht die dominierende Rolle. Und ob wir aus dem Kosmos eintreffende Strahlungen richtig gedeutet hätten, ohne je Sichtkontakt mit einem anderen Stern gehabt zu haben, ist mehr als fraglich.

Eine Fliege im Zug

Jetzt sind wir auch in der Lage, die Frage zu beantworten, wie es denn einer Fliege ergeht, die sich in einem Zug befindet. Kann sie denn überhaupt dem dahinrasenden Gefährt folgen? Wird sie nicht vielmehr an der Rückwand des Abteils zerschellen müssen? Ähnliche Fragen werden immer wieder einmal gestellt.
Wir möchten die Zwischenbemerkung machen, daß derjenige, dem eine Fliege zu unappetitlich ist, sich natürlich ein anderes, ihm genehmeres Insekt vorstellen kann. Es muß nur fliegen können.
Die Beantwortung der Frage nach dem Schicksal der Fliege in einem fahrenden Zug bereitet uns nun keine Schwierigkeiten.
Wenn sich der Zug gleichförmig geradlinig bewegt, so befindet sich die Fliege in einem Inertialsystem. In diesem gelten die gleichen Bewegungsgesetze wie in einem Zug, der in bezug auf die Erde steht. Möge die Geschwindigkeit noch so groß sein, die Fliege kann sich in unserem Abteil so bewegen wie in der guten Stube. Sie kann starten und landen, wie und wo sie will. Ihre Flugbahnen im Abteil des dahineilenden Zuges gleichen denen im ruhenden Zimmer. Dazu trägt die Tatsache bei, daß die Luft im Abteil an der Bewegung teilnimmt. Die Fliege – nimmt man einmal an, daß sie nicht weit sehen kann – wird es überhaupt nicht bemerken, daß sie sich in einem fahrenden Zug befindet. Es ist auch völlig gleichgültig, welche der Wände des Abteils sie als Start- oder Landeplatz benutzt.
Vielleicht haben wir den Einwand auf den Lippen, daß doch aber die Fliege im Abteil viel schneller sei als eine Fliege draußen am Bahndamm. Dieser Einwand zeigt nur, wie schwer es uns fällt, uns in das bewegte System zu versetzen. Vielleicht hilft uns dabei der dem System *S* angehörende Hinweis, daß die Fliege beim jeweiligen Start im Zug den entsprechenden Impuls, die entsprechende Geschwindigkeit mitbekommt.
Unter Umständen kommt ein Außerirdischer zu ähnlichen Ergebnissen, wenn er den Start und die Landung eines irdischen Flugzeugs beobachtet.
Wenn unser Zug hingegen die Geschwindigkeit ändert, muß die Fliege die Trägheitskräfte beachten. Wenn der Zug beschleunigt, wird es leichter sein, von der vorderen Wand des Abteils zu starten als von der hinteren, da im ersten Fall die Trägheits-

kraft das Starten unterstützt, im zweiten hemmt. Auch die Landung dürfte in dieser Phase auf der vorderen Wand gut zu bewerkstelligen sein, da die Trägheitskraft als eine Art Bremsfallschirm genutzt werden kann.
Beim Bremsen des Zuges verhält sich alles umgekehrt. Jetzt übernimmt die hintere Wand des Abteils die Rolle der günstigen Stelle für Start und Landung. Es sind keine Untersuchungen darüber bekannt, ob fliegende Insekten in beschleunigten Bezugssystemen diese Ergebnisse instinktiv „beachten". Es steht aber fest, daß eine Fliege ein zu guter Flieger ist, als daß sie durch die Trägheitskräfte in einem Zug vor ernsthafte Probleme gestellt werden könnte.
Schwieriger wird es für die fliegenden Insekten, wenn sie plötzlich die Systemgrenzen überschreiten müssen. Wenn die Fliege z. B. von außen in einen fahrenden Zug hineinfliegt, so ist ihre Relativgeschwindigkeit in bezug auf das Fahrzeug recht hoch. Im Extremfall ist sie größer als die Geschwindigkeit des Zuges. Hier wird es wohl aller Flugkünste bedürfen, um unbeschadet zu landen. Die mitbewegte Luft im Abteil und die Tatsache, daß zwischen dem Einfliegen und dem Berühren der hinteren Wand des Abteils eine bestimmte Zeitspanne liegt, werden das Insekt vor Schaden bewahren. Wenn dieses „Polster" nicht vorhanden ist, kann das Überwechseln in ein anderes Bezugssystem für das Insekt tödlich sein. Davon zeugen die zahlreichen getöteten Insekten auf Frontscheibe und Motorgrill nach einer abendlichen Autofahrt im Sommer.

Kräfte am Zug

Interessant und zuweilen belustigend sind Berichte über die Fahrten der ersten Eisenbahnzüge und der ersten Autos. Neben – durchaus verständlichen – Ängsten vor eventuellen psychischen und physischen Schäden bei Reisenden und Zuschauern gab es auch eine Reihe von Einwänden und Fragen, die einer gewissen Komik nicht entbehrten. So wurde z. B. ein Einspruch gegen das Fahren von Eisenbahnzügen damit begründet,

daß bei Kühen durch den Anblick dieses rasenden Ungeheuers die Milchleistung zurückgehen müsse.
Andere wiederum fragten sich und andere, wie es denn möglich sein könne, daß die Lokomotive ganz von selbst losfahren und sogar einige Wagen hinter sich her ziehen könne. Man sehe doch keine Pferde. So ganz abwegig war der Einwand nicht. Besagte doch eine jahrtausendealte Erfahrung der Menschen, daß zum Ziehen von Wagen Tiere oder Menschen notwendig sind. Und so soll es denn bei den Erstfahrten der Eisenbahn ganz Mißtrauische gegeben haben, die, weil sie Scharlatanerie vermuteten, unter die Lokomotive schauten. Sie vermuteten getarnte Pferde. Es fiel eben auch hier schwer, umzudenken (Abb. 18).

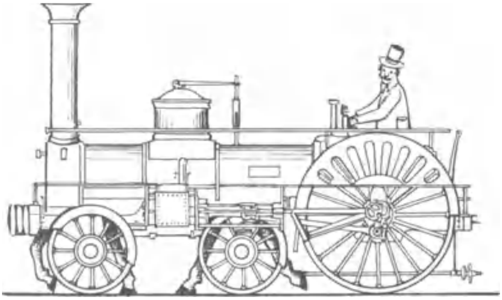


Abb. 18. Verstecktes Pferd

Pferd und Wagen spielten jedoch bei der Entwicklung von Bahn und Auto eine gewisse Rolle. Wie sollte es auch anders sein. Immer wächst das Neue aus dem Bekannten. Und so muß es eigentlich nicht verwundern, daß die ersten Eisenbahnwagen den Postkutschen sehr ähnlich waren. Auch die ersten Autos waren der Form nach eigentlich Pferdekutschen. Nur Deichsel und Pferd fehlten. Steuerrad und notwendige Hebel wirkten fast störend.
Auch in einer physikalischen Einheit kommt diese Beziehung zwischen alt und neu zum Ausdruck. Wir meinen die von keinem Geringeren als James Watt (1736–1819) eingeführte Einheit für die mechanische Leistung, die Pferdestärke (PS). Sicher wollte Watt durch diese Namensgebung eine anschauliche Einheit einführen, war doch das Pferd *das* Traktionsmittel des 18. Jahrhunderts. Obwohl diese Einheit von Anfang an falsch war – kein Pferd der Welt hat eine Dauerleistung von einem PS – und obwohl sie nicht mehr in moderne Einheitensysteme

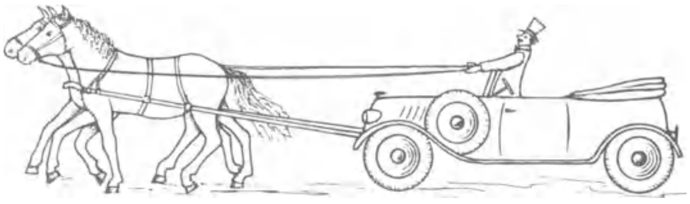


Abb. 19. Pferdestärken

paßte (1 PS = 0,735 499 kW), hielt sich diese Einheit bis in unsere Tage. Und selbst heute noch benutzt mancher stolze Autobesitzer diese Einheit, hat er durch sie doch das Gefühl, mit 20, 40 oder mehr „Pferden“ dahinzujagen (Abb. 19).
Wie ist das nun bei unserem Zug? Pferde sind es nicht, die ihn ziehen. Woher aber kommt die Zugkraft der Lokomotive, die es ihr erlaubt, Züge von mehreren hundert Tonnen Masse durch Berg und Tal zu ziehen?
Die Kräfte, die eine Lokomotive entwickelt, sind beachtlich. So hat z. B. eine Diesellokomotive der Baureihe 120 (V 200) eine Anfahrtszugkraft von 373 kN, ihre Dauerzugkraft beträgt immerhin noch 196 kN. 1 kN ist die Krafteinheit 1 Kilonewton. Wir wollen uns jetzt veranschaulichen, wie groß die Kraft einer solchen Lokomotive ist.
Auf einen Menschen, dessen Masse 80 kg beträgt, wirkt eine Gewichtskraft von etwa 0,8 kN. Demzufolge reicht die Kraft, die eine Lokomotive der Baureihe 120 beim Anfahren entwickeln kann, aus, um 466 Menschen von 80 kg Masse zu heben (Abb. 20).

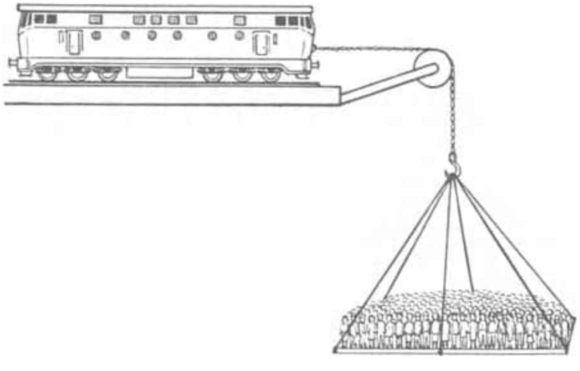


Abb. 20. Zugkraft einer Lokomotive

Bei starken Elektrolokomotiven sind diese Kräfte noch größer. So kann die Anfahrtszugkraft 400 kN übersteigen.
Woher stammen nun also diese großen Kräfte? Wir wissen natürlich alle, daß sich in den Triebfahrzeugen Motoren befinden. Diese Maschinen erzeugen durch die Umwandlung geeigneter Energiearten – chemische oder elektrische Energie – in mechanische Energie ein Drehmoment.
Das Drehmoment, das meist mit *M* bezeichnet wird, ist eine physikalische Größe, die die Drehwirkung einer Kraft auf einen Körper beschreibt. Das Drehmoment ist gleich dem Produkt aus dem Betrag der Kraft und dem Abstand *r* der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt *A* (Abb. 21). An der Abbildung und der an-

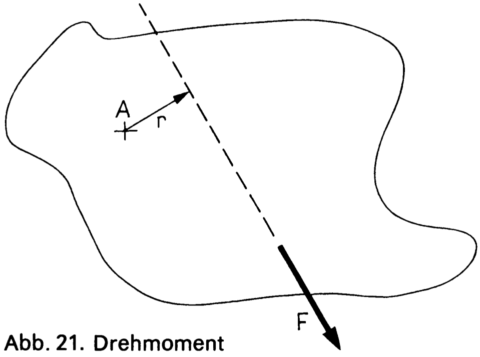


Abb. 21. Drehmoment

gegebenen Definition erkennt man, daß nicht allein der Betrag der Kraft für ihre Drehwirkung entscheidend ist, sondern auch ihr Abstand vom Drehpunkt oder, besser gesagt, der Abstand ihrer Wirkungslinie. Geht diese durch den Drehpunkt, ist jede Drehwirkung ausgeschlossen. Das Pedal eines Fahrrads z. B. in seiner tiefsten Stellung nach unten treten zu wollen bringt keinerlei Vorschub, ist deshalb ohne Sinn.
Das Drehmoment, das der Motor der Lokomotive erzeugt, wird in geeigneter Weise auf die getriebenen Räder übertragen.
Auch bei Dampflokomotiven wird die von der Dampfmaschine erzeugte lineare Bewegung durch Kurbelwellen in eine Rotationsbewegung umgewandelt.
Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, daß es bei Lokomotiven nicht nur getriebene Räder gibt. Im allgemeinen haben Lokomotiven auch noch Laufräder, die nur Stützfunktion haben und auf die infolgedessen auch keine Drehmomente übertragen werden. In Waggons gibt es nur Laufräder.

In diesem Zusammenhang gibt es oft Unsicherheiten beim Gebrauch der Termini „Welle" und „Achse". Eine Achse hat nur Trägerfunktion. Sie überträgt Kräfte auf die Lager. Achsen werden i. allg. auf Biegung beansprucht.
Demgegenüber haben Wellen die Aufgabe, Drehmomente zu übertragen. Sie werden deshalb auf Verdrehung und Biegung beansprucht.
Jetzt soll die Frage nach dem Entstehen der Zugkraft einer Lokomotive endgültig beantwortet werden. Die Reibung ist es, die die Zugkraft der Lokomotive möglich macht. Ohne Reibung keine Zugkraft! Und zwar ist es vor allem die Haftreibung und nicht die Rollreibung, die hier eine Rolle spielt.
Um uns die Sachlage klarzumachen, beginnen wir mit einem Gedankenexperiment. Wir nehmen an, daß man die Lokomotive so aufgehängt hat, daß die Räder den Boden nicht mehr berühren (Abb. 22). Was wird nach dem Einschalten des Motors geschehen? Die Räder werden sich drehen. Jedoch wird man weder einen Vorschub noch eine Zugkraft beobachten können. Die Räder drehen frei durch.

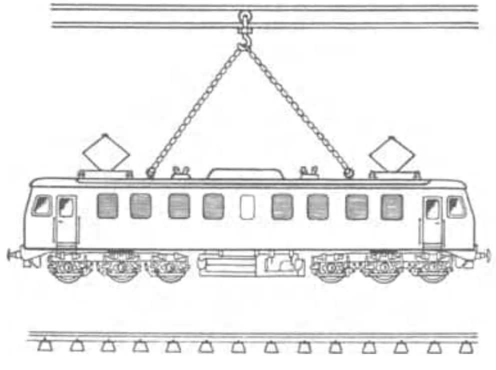


Abb. 22. Hängende Lok

Wenn man jetzt die Lokomotive langsam absenkt, so ist in dem Moment, in dem die Räder das Gleis berühren, ein Vorschub, eine Zugkraft festzustellen. Also muß der Kontakt mit der Schiene entscheidend sein für das Entstehen der Zugkraft.
Wir können zwar zu Hause keine Lokomotiven aufhängen, aber ein einfaches Experiment kann uns jetzt helfen. Wir bauen uns freilich keine vollständige Lokomotive, ein Rad mit einer Welle genügt uns. Als Rad ist jede kreisrunde Scheibe geeignet, viel-

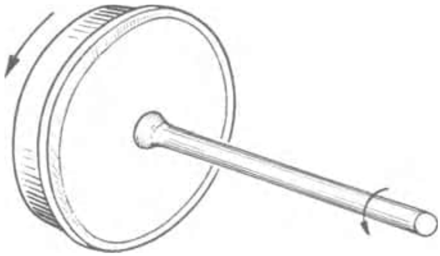


Abb. 23. Modellrad mit Welle

leicht ein Bierdeckel. Als Welle kann ein Bleistift fungieren, wenn nur die Scheibe fest auf ihm sitzt (Abb. 23).
Wenn man dieses Ersatz-Triebrad zwischen Daumen und Zeigefinger in der Luft hin- und herdreht, so spürt man in der Hand zwar das Gewicht des Rades, jedoch keinerlei „Zugkraft", weder nach links noch nach rechts. Setzt man aber das Modellrad auf einer – nicht zu glatten – Unterlage auf, so spürt man sofort eine Triebkraft in die Richtung, in die eine Lokomotive bei entsprechender Drehrichtung ihrer Räder fahren würde.
Was geschieht beim Aufsetzen auf der Unterlage? Es entsteht eine Reibung. Das ist immer so, wenn ein Körper sich auf einem anderen Körper bewegt bzw. auf ihm bewegt werden soll. Die Reibung entsteht durch verschiedenartige atomare Wechselwirkungen zwischen den sich berührenden Körpern. Die Reibung ist eine Kraft. Sie wirkt gegen die Bewegung. Die Reibungskraft soll mit F_R bezeichnet werden. Die Reibungskraft hängt sowohl von der Art der sich berührenden Flächen als auch von der Kraft ab, mit der die Körper aufeinander wirken.
Untersuchen wir etwas genauer die Haftreibung, weil sie für unsere Fragestellung wichtig ist. Auf einem Tisch liegt in aller Ruhe ein Buch (Abb. 24). Wie groß ist die Reibungskraft? Man ist ge-

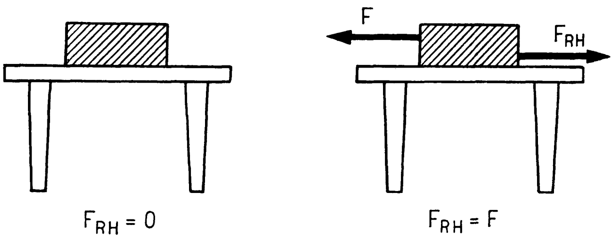


Abb. 24. Haftreibung

neigt, die Kraft zu berechnen. Man erkundigt sich nach der Art der Oberfläche von Buch und Tisch und nach der Masse des Buches, weil man sich an die Beziehung $F_R = \mu mg$ erinnert. Weit gefehlt! Wenn das Buch ruhig auf dem Tisch liegt, wirkt überhaupt keine Reibung. Das ist so, weil es ja auch keine Kraft gibt, die das Buch zu bewegen versucht.
Erst wenn wir etwas zu ziehen beginnen, ohne daß sich das Buch bewegt, wirkt eine Reibungskraft, die so groß ist wie die Kraft, mit der wir am Buch ziehen. Da sich das Buch nicht bewegt, spricht man von einer Haftreibungskraft F_{RH}. Was geschieht nun aber, wenn man stärker zieht, ohne daß sich das Buch bewegt? Die Haftreibungskraft muß größer geworden sein. Denn wäre sie konstant geblieben, so wäre sie jetzt kleiner als die Zugkraft, die wir ja vergrößert haben. Dann müßte sich aber das Buch bewegen. Was für eine interessante Kraft! Je stärker man am Buch zieht, desto stärker die Haftreibung. Das hat jedoch Grenzen. Die Haftreibungskraft kann nur bis zu einem Maximalwert $F_{RH\,max}$ wachsen. Dieser Maximalwert hängt von der Art der Oberflächen der sich berührenden Körper und von der Normalkraft F_N ab, mit der der Körper auf die Unterlage wirkt: $F_{RH\,max} = \mu F_N$. Die Zahl μ beschreibt die Abhängigkeit der Reibungskraft von den Flächen. Sie heißt Haftreibungskoeffizient. Für Stahl auf Stahl – das ist das Beispiel, das wir brauchen – beträgt μ 0,15. Das bedeutet, daß bei der Haftreibung von Stahl auf Stahl 15 % der Normalkraft der Haftreibungskraft im Maximalfall entsprechen. Zur Veranschaulichung nehmen wir einmal an, daß wir eine Lokomotive haben, deren Masse 100 t beträgt. Das ist eine durchaus reale Annahme. Auf diese Lokomotive wirkt eine Gewichtskraft von 981 kN. Dann beträgt die Haftreibungskraft auf ebener Strecke für unser Beispiel 147 kN. Wohlgemerkt, das ist die maximale Haftreibungskraft. Wird die Zugkraft größer, so beginnt die Lokomotive zu rutschen, so wie das Buch auf dem Tisch zu gleiten beginnt. Dann spricht man von Gleitreibung. Die entsprechenden Koeffizienten sind kleiner. Für Stahl auf Stahl beträgt der entsprechende Gleitreibungskoeffizient 0,1. Statt 15 % nur 10 %.
Müßte man aber beim Zug nicht doch die Rollreibung nehmen? Zur Beantwortung dieser Frage betrachten wir die Abb. 25. Auf ihr ist ein getriebenes Rad dargestellt, also ein Rad, auf das durch eine Welle ein Drehmoment übertragen wird. *D* ist der Drehpunkt des Rades, *B* der Berührungspunkt des Rades mit der Schiene. Infolge des Drehmoments entsteht am Berührungspunkt die Kraft F_1. Gäbe es keine Reibung zwischen Gleis und

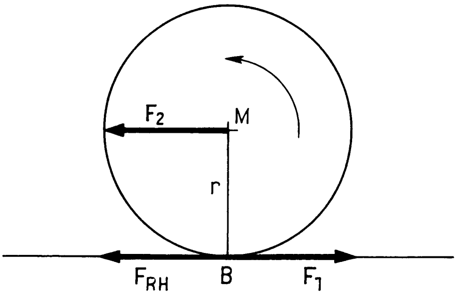


Abb. 25. Haftreibung am getriebenen Rad

Rad, würde das Rad so durchdrehen, als ob die Lokomotive noch aufgehängt wäre. Zum Glück ist aber immer eine Reibung vorhanden, wenn ein Körper auf einem anderen zu gleiten bestrebt ist. Wie bei vielen anderen Gelegenheiten ist die Reibung auch in diesem Falle erwünscht. Denn durch sie entsteht die Reibungskraft F_{RH}, die die Kraft F_1 kompensiert. Für eine differentiell kleine Zeitspanne bleibt deshalb der Berührungspunkt in Ruhe. Da das für alle momentanen Berührungspunkte zwischen Rad und Schiene gilt, sind wir berechtigt, von Haftreibung zu sprechen. Wenn aber B in Ruhe bleibt, so hat das Drehmoment, das ja weiterhin erzeugt wird, die Wirkung, daß am Drehpunkt die Kraft F_2 entsteht. Diese Kraft F_2 ist die Zugkraft, bezogen auf das betrachtete Rad.

Aus den letzten Ausführungen wird deutlich, daß die Zugkraft durch die maximale Haftreibungskraft begrenzt wird. Wird die von der Antriebsmaschine erzeugte Zugkraft größer als diese maximale Haftreibungskraft, so beginnen die getriebenen Räder der Lokomotive durchzudrehen. Infolgedessen wirkt in Fahrtrichtung nur noch die Gleitreibung, deren Koeffizient kleiner ist als der der Haftreibung. Folgerichtig nimmt die effektive Zugkraft der Lokomotive am Zughaken ab. Mit durchdrehenden Rädern kann kein Lokomotivführer anfahren.

Jetzt sind wir auch in der Lage, die Frage zu beantworten, wieso eine Lokomotive einen Zug ziehen kann, dessen Masse die Masse der Lokomotive um ein Vielfaches übertrifft. Heute erscheint uns das die selbstverständlichste Sache der Welt zu sein. Wir sehen es doch täglich. Am Anfang des Lokomotivbaus jedoch vertraten viele Konstrukteure die Meinung, daß keine Lokomotive einen Zug ziehen könne, dessen Masse größer als ihre eigene Masse ist. So ist es verständlich, daß Brochton 1813 seine

Lokomotive mit fußähnlichen Gebilden versah, die zum Abstoßen vom Erdboden gedacht waren. Die Erklärung folgt aus der Tatsache, daß für die Zugkraft der Lokomotive die Haftreibung verantwortlich ist, deren Koeffizient die der anderen Reibungsarten übersteigt. Für den Fahrwiderstand des gezogenen Zuges spielen neben dem Luftwiderstand Gleit- und Rollreibung eine Rolle. Die Koeffizienten dieser Reibungsarten sind kleiner als die Zahlen bei der Haftreibung. So kommt es, daß die Zugkraft der Lokomotive größer ist als die Gegenkraft des gesamten Zuges, obwohl ihre Masse viel kleiner ist als die Gesamtmasse aller Wagen mit Inhalt.
Es sei darauf verwiesen, daß infolge der hohen Druckkräfte, die die Lokomotive auf das Gleis ausübt, Deformationen eintreten. Infolge dieser Verformungen von Rad und Schiene gibt es keinen idealen Berührungspunkt, sondern verschiedenartig geformte Berührungsflächen.
Bei Eis und Nässe wird der Haftreibungskoeffizient herabgesetzt. Die Folge davon ist, daß die Räder leichter durchdrehen und die erforderliche Zugkraft nicht erreicht wird. Davon können wir uns mit Hilfe unseres Modellrades mühelos überzeugen. Wir setzen es auf eine glatte Oberfläche – etwa eine Glasplatte – und drehen es. Wir werden eine deutliche Abnahme der Zugkraft spüren.
Was kann man in einem solchen Falle machen? Man kann die Zugkraft durch das Vorspannen einer zweiten Lokomotive erhöhen. Man kann Sand streuen und so den Reibungskoeffizienten erhöhen. Und man kann schließlich, soweit das Fahrzeug ein Auto ist, schieben (Abb. 26).

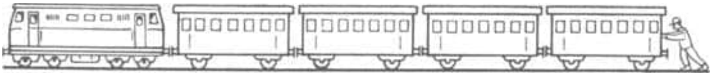


Abb. 26. Die Reibung ist zu klein

Nun könnte man fragen, warum man bei Eisenbahnen Stahlräder auf Stahlschienen rollen läßt. In diesem Falle beträgt der Reibungskoeffizient doch nur 0,15. Bei anderen Materialien wären jedoch größere Werte erreichbar.
Hier ist es mit der Antwort so, wie oft bei technischen Problemen. Niemals hat man es nur mit einer einzigen Fragestellung zu tun. Vielmehr sind die Vorgänge so komplex, daß man aus einer Vielzahl von Bedingungen und Gesetzmäßigkeiten eine optimale Lösung finden muß.

So geht es eben bei der Fahrt eines Zuges nicht nur um die Zugkraft, sondern auch um Fragen der Festigkeit und der Haltbarkeit der Anlagen, der Kosten, der Fahreigenschaften usw.
Würde man die Reibungszahlen durch andere Materialien erhöhen, so würde leider nicht nur die erwünschte Haftreibung, sondern auch die unerwünschte Rollreibung der Räder, der Wagen und des Triebfahrzeugs vergrößert. Dadurch würde der Verbrauch an Brennstoff sofort hochschnellen. Vom jetzigen Erkenntnisstand aus ist der Zug mit stählernen Rädern und Schienen eine gute Lösung.
Beim Auto ist es ähnlich. Der Reifen hat zwar nicht die kleinste Reibungszahl. Es ist jedoch so, daß er für Anfahren, Beschleunigen, Bremsen und Durchfahren von Kurven eine optimale Lösung darstellt.
Mit den Kräften hängen drei weitere physikalische Größen zusammen, mit denen wir uns jetzt beschäftigen wollen. Wir meinen die Größen Arbeit, Energie und Leistung.
Wenn der Zug mit Hilfe der Zugkraft der Lokomotive einen Weg zurücklegt, verrichtet diese eine Arbeit. Denn wir wissen, daß die mechanische Arbeit W gleich dem Produkt aus der Kraft F und dem Weg s ist ($W = Fs$).
Wenn aber an einem System Arbeit verrichtet wird, so erhöht sich bekanntlich seine Energie. So ist das auch bei unserem Zug. Er wird schneller, und infolgedessen erhöht sich seine kinetische Energie $E_{kin} = 0{,}5mv^2$. Die kinetische Energie eines fahrenden Zuges ist infolge der Größe der beteiligten Massen hoch. Nehmen wir beispielsweise einmal an, daß sich ein Zug von 1200 t Masse mit einer Geschwindigkeit von 85 km · h^{-1} bewegt, so erhalten wir für diesen Zug eine kinetische Energie von 334 MJ (Megajoule). Um eine Vorstellung von der bemerkenswerten Größe dieser Energie zu vermitteln, sei erwähnt, daß man 34 Lokomotiven von je 100 t Masse 10 m hoch heben könnte, wenn man diese Energie vollständig in Hubarbeit umsetzen würde.
Damit nun dieser Zug zum Halten kommt, muß man dafür sorgen, daß er eine Arbeit verrichtet, die dieser Energie entspricht. Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten.
Die erste Möglichkeit besteht darin, ihn eine Steigung hinauffahren zu lassen. Dabei gewinnt er an potentieller Energie auf Kosten seiner kinetischen Energie. Das geht bei Vernachlässigung der Reibung so lange, bis die potientielle Energie um den Betrag zugenommen hat, den die kinetische Energie des Zuges vorher hatte. Diese Methode wendet man mit Erfolg am Auslauf man-

cher Sprungschanzen an, für das Anhalten von Eisenbahnzügen wäre dieses Verfahren zwar originell, aber wenig praktikabel.
Für unser Anliegen, anschaulich zu sein, wollen wir trotzdem einmal berechnen, wie hoch der Berg wäre, den unser Beispielzug bei Vernachlässigung der Reibung im Ausrollen noch hinauffahren könnte. Wir setzen $E_{kin} = E_{pot}$, also $0{,}5mv^2 = mgh$. Daraus erhalten wir für h die Beziehung

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Bevor wir unsere Werte einsetzen, wollen wir die Gleichung zur Berechnung von h interpretieren. Das Auffälligste ist doch wohl, daß die Masse des Zuges überhaupt keine Rolle mehr spielt. Ein schwerer Zug rollt genau so hoch wie ein leichterer. Rebelliert da nicht der gesunde Menschenverstand? Wir können uns wieder beruhigen. Wir müssen nämlich bedenken, daß der schwerere Zug ja bei Beginn der Bergfahrt eine höhere kinetische Energie als der leichtere Zug hat. Die gesuchte Höhe hängt quadratisch von der Geschwindigkeit ab, die der Zug in der Ebene hatte. Eine Abhängigkeit von v war zu erwarten. Zweitens spielt auch g eine Rolle, also die Stärke der Gravitationsbeschleunigung am betrachteten Ort. Bei Abnahme dieser Beschleunigung kann der Zug höher hinaufrollen. Unsere Gleichung stimmt mit dieser Aussage überein.
Nach Einsetzen der Geschwindigkeit unseres Beispielzuges in unsere Gleichung erhält man das Ergebnis, daß der Zug in einer Höhe von 28,4 m zum Halten kommen würde. Das ist bei der großen Masse von 1200 t durchaus beachtlich.
Eine zweite, wenn auch wenig rentable Methode des Anhaltens könnte darin bestehen, den Zug auf ebener Strecke ausrollen zu lassen, bis durch den Fahrwiderstand – Reibung plus Luftwiderstand – seine kinetische Energie „aufgebraucht" wäre. Dieses Verfahren ist deshalb so wenig effektiv, weil die Fahrwiderstandszahl nur 0,002 beträgt. Der Ansatz wäre ähnlich wie vorhin. Wir würden die kinetische Energie gleich der Reibungsarbeit $F_R = \mu mgs$ setzen und die Gleichung nach s umstellen. Wieder würde m aus der Rechnung herausfallen. Das ist deshalb so, weil der schwerere Zug zwar die höhere kinetische Energie hat, aber andererseits entsprechend mehr Reibungskraft zu überwinden hat. Für s würde sich die folgende Beziehung ergeben:

$$s = \frac{v^2}{2\mu g}.$$

Wenn man die Zahlen für unseren Beispielzug einsetzt, erhält man für s den erstaunlichen Wert von 14207 m. Unser Zug würde also noch mehr als 14 km ausrollen. Man stelle sich einmal die Gesichter der Personen vor, die auf einem 6 km entfernten Bahnhof auf diesen Zug warten würden.
Die dritte, in der Praxis tatsächlich angewandte Methode besteht darin, alle Glieder des Zuges einzeln zu bremsen. Zu diesem Zwecke ist die Lokomotive durch eine Druckluftleitung mit allen Wagen verbunden. Mit Hilfe der Druckluft werden beim Bremsen Bremsklötze an die Räder gepreßt. Die starke Gleitreibung zwischen Rad und Bremsbacken führt zur Erhitzung und somit zur Umwandlung von kinetischer Energie in thermische Energie. Energetisch betrachtet kommt der Zug zum Stehen, wenn dieser Umwandlungsprozeß beendet ist. Vom Standpunkt der Kraft aus kann man sagen, daß die Gleitreibung zwischen Rad und Bremsbacken die Bremskraft hervorbringt, die über das rollende Rad und die Schiene auf den Schwerpunkt des Fahrzeugs übertragen wird. Das geht auch in diesem Falle nur so lange gut, wie die maximale Haftreibungskraft zwischen Rad und Schiene nicht überschritten wird. Überschreitet die Reibungskraft zwischen Rad und Bremsbacken die Haftreibungskraft zwischen Rad und Schiene, so wird die Achse blockiert, und die Räder beginnen zu gleiten. Das ist ein gefährlicher Vorgang, dem der Lokomotivführer durch gefühlvolles Intervallbremsen entgegenwirken muß.
Man kann Bremsverzögerungen von $0{,}3\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ erreichen. Damit verkürzt sich der Bremsweg von 14000 m auf etwa 95 m.
Wir interessieren uns jetzt für die Frage, ob sich die Bremsklötze eigentlich sehr erwärmen.
Betrachten wir dazu das Zahlenbeispiel. Unser Zug hat eine kinetische Energie von 334 MJ. Nehmen wir an, daß nur 60 % dieser Energie an den Bremsklötzen in Wärme umgewandelt werden. Wir berücksichtigen bei dieser Annahme, daß es ja noch andere Widerstände gegen die Bewegung gibt. Also müssen wir 200,4 MJ an den Bremsklötzen umwandeln. Aus der Wärmelehre kennen wir die Gleichung $Q = mc\Delta T$. Q ist die Wärme, c die spezifische Wärmekapazität und ΔT die gesuchte Temperaturdifferenz. Die Bremsklötze bestehen aus Gußeisen. Deshalb ist $c = 0{,}54\,\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$. Die Masse eines Bremsklotzes beträgt 9 kg. Wenn wir davon ausgehen, daß unser Zug 29 Wagen mit je 4 Rädern und folglich 8 Bremsklötzen hat, beträgt die Gesamtmasse der Klötze 2088 kg. Für die gesuchte Temperaturdifferenz erhalten wir aus der obigen Gleichung die Beziehung

$\Delta T = Q/(mc)$, die mit unseren Zahlen eine Temperaturdifferenz von 178 K ergibt. Das ist eine sehr beachtliche Erwärmung.
Zum Glück haben wir in unserer Rechnung zwei Dinge nicht berücksichtigt. Das ist erstens die Tatsache, daß ja die Lokomotive auch bremst und daß sich ja nicht nur die Bremsklötze, sondern auch die Umgebung und die Räder erwärmen.
Wir waren von der Frage ausgegangen, wie wir einen Zug zum Halten bringen können. Dabei haben wir erkannt, daß man den Zug so lange Arbeit verrichten lassen muß, bis seine kinetische Energie in andere Energieformen umgewandelt worden ist, man muß ihn gewissermaßen sich müde laufen lassen.
Physikalisch kommt dieser Zusammenhang in der folgenden Gleichung zum Ausdruck:

$$W = \Delta E = E_{\text{Ende}} - E_{\text{Anfang}} .$$

Arbeit W bedeutet also immer Energieänderung ΔE. Wenn die Energie konstant bleibt, ΔE also gleich 0 ist, wird keine Arbeit verrichtet. Das Halten eines Blatts Papier am ausgestreckten Arm ist genauso wenig mechanische Arbeit wie das Tragen eines Koffers in einer Ebene (Abb. 27). Auch wenn man bei diesen Vorgängen noch so sehr ermüdet, mechanische Arbeit hat man dabei nicht verrichtet.

Abb. 27. Die mechanische Arbeit ist Null

Wenn ΔE positiv ist, wenn also die Energie wächst, so spricht man davon, daß am System oder am Körper eine Arbeit verrichtet wird. W ist in diesem Falle auch positiv.
Wenn dagegen ΔE und damit W negativ sind, so sagt man, daß das System oder der Körper eine Arbeit verrichtet. In einem solchen Falle nimmt die Energie des Systems ab.
Nachdem wir über Energie und Arbeit interessante Überlegun-

gen anstellen konnten, wenden wir uns der dritten der eingangs erwähnten Größen zu. Das ist die Leistung P.
Durch die Leistung wird die Zeit ins Spiel gebracht. „100 m zu laufen, ist keine Leistung, wenn man die Strecke in mehreren Minuten zurücklegt. Aber sie in 12 s und darunter zu durchlaufen, ist eine bemerkenswerte Leistung." Es wurde sicher bemerkt, daß hier das Wort „Leistung" im Sinne der Alltagssprache und nicht als Terminus verwandt wurde.
Den Terminus „Leistung" definiert die Physik in Anlehnung an die Alltagssprache so:

$$P = \frac{W}{t}.$$

W ist die Arbeit, t die Zeit. Je kleiner die Zeit ist, in der eine bestimmte Arbeit verrichtet wird, desto größer ist die Leistung.
Aus der Gleichung folgt für die Leistung die Einheit „Joule pro Sekunde ($\mathrm{J \cdot s^{-1}}$)". Sie wird auch als „Newtonmeter pro Sekunde ($\mathrm{Nm \cdot s^{-1}}$)" oder als „Watt (W)" bezeichnet.
Oft gibt es Unsicherheiten beim Gebrauch der Termini Leistung und Energie. Deshalb die folgende Anmerkung:
Wenn eine Maschine eine Leistung von beispielsweise $1000\,\mathrm{J \cdot s^{-1}}$ hat, dann kann sie in jeder Sekunde, in der sie mit voller Leistung arbeitet, eine Arbeit von 1000 J verrichten.
Die Aussage: „Das Gerät hat eine Leistung von 5 kW in einer Stunde" ist falsch. Sie muß lauten: „Das Gerät hat eine Leistung von 5 kW." Wie lange das Gerät arbeitet, ist in diesem Zusammenhang ohne Interesse. 5 kW Leistung zu haben, heißt eben, in jeder Sekunde $5\,\mathrm{kW \cdot s}$ Arbeit verrichten zu können.
Andererseits nützt die Aussage wenig, ein Kraftwerk erzeuge eine Energie von $10^5\,\mathrm{kW \cdot h}$. Man benötigt dazu die Angabe, in welcher Zeit das geschieht.
Nachdem wir das Bremsen und das Anhalten näher untersucht haben, wollen wir uns jetzt noch einmal dem Anfahren eines Zuges zuwenden.
Bei diesem Vorgang muß die Lokomotive zwei Arten von Arbeit verrichten: die Beschleunigungsarbeit (W_B) und die Arbeit zur Überwindung des Fahrwiderstandes (W_R). Der Fahrwiderstand umfaßt alle Bewegungshemmnisse, z. B. Roll- und Gleitreibung sowie Luftwiderstand. Die entsprechenden Gleichungen sind $W_B = mas$ und $W_R = \mu F_N s$. Während W_B den Zug tatsächlich beschleunigt, verursacht W_R lediglich eine Erwärmung.
Auch hier wollen wir mit konkreten Zahlen arbeiten. Unser Zug

mit 1200 t Masse soll mit einer durchschnittlichen Beschleunigung von $0{,}2\,m \cdot s^{-2}$ anfahren. Die Fahrwiderstandszahl sei 0,002. Da die Endgeschwindigkeit $85\,km \cdot h^{-1}$ beträgt, ist der Beschleunigungsweg $s = v^2/2a = 1\,393{,}7\,m$. Auf dieser Strecke verrichtet die Lokomotive eine Beschleunigungsarbeit von $W_B = mas = 334\,MJ$. Das stimmt mit der oben errechneten Zahl für die kinetische Energie überein. Die auf der Beschleunigungsstrecke zu erbringende Reibungsarbeit beträgt entsprechend der Gleichung $W_R = \mu mgs = 32{,}8\,MJ$. Das sind fast 9% der Gesamtarbeit.

Wie groß ist denn nun die Leistung der Lokomotive bei diesem Beschleunigungsvorgang? Da bei der Leistung die Zeit eine Rolle spielt, müssen wir zuerst berechnen, wie lange der Zug beschleunigt wird. Für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung gilt bekanntlich die Gleichung $s = at^2/2$. Aus ihr folgt die Beziehung $t = \sqrt{2s/a}$. Mit unseren Zahlen erhalten wir das Ergebnis, daß der Beschleunigungsvorgang in unserem Falle 118 s dauert. Um die Leistung zu erhalten, müssen wir die Summe aus Beschleunigungs- und Reibungsarbeit durch diese Zeit dividieren. Wir erhalten für die Leistung, die die Lokomotive während des Beschleunigens erbringen muß, 3,1 MW. Das ist eine hohe Leistung, die jedoch für moderne Hochleistungslokomotiven durchaus real ist.

Wir müssen uns bei solchen Berechnungen darüber im klaren sein, daß man dabei nur mit Durchschnittswerten arbeitet. Man tut wider besseres Wissen so, als ob Beschleunigung und Leistung während des gesamten Beschleunigungsvorgangs konstant blieben. Eine solche Annahme vereinfacht die Rechnungen wesentlich, und die Ergebnisse, die man dabei erhält, reichen für viele Fragestellungen aus.

In der Realität gibt es natürlich keine solchen Durchschnittswerte. Es ist vielmehr so, daß sich Zugkraft und Leistung einer Lokomotive beim Anfahren stark verändern (Abb. 28). Am Diagramm erkennt man deutlich, daß die Zugkraft am Beginn ihren höchsten Wert hat und dann abnimmt, während die Leistung demgegenüber steigt. Zu diesem Diagramm sind noch einige Anmerkungen notwendig. Die hohe Anfangszugkraft hat nur theoretischen Wert, da – wie wir weiter oben sahen – die reale Anfahrtszugkraft am Zughaken durch die maximale Haftreibungskraft begrenzt ist. Der Knick in der Kurve der Zugkraft kommt dadurch zustande, daß man zwei Kurven aneinandergefügt hat. Im ersten Teil hängt die Zugkraft von der Haftreibung ab, während sie im zweiten Teil der Kurve stark von der Ände-

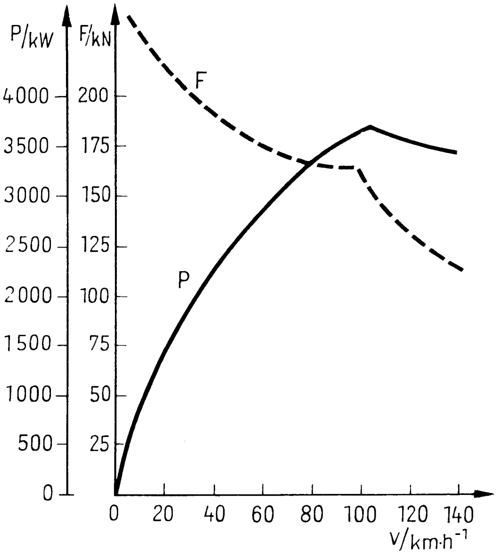


Abb. 28. Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm

rung der Geschwindigkeit abhängt. Zum Diagramm sei noch angemerkt, daß man aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Wartung bestrebt ist, die Antriebsmaschine mit einer konstanten Dauerleistung zu fahren, die natürlich unterhalb der hohen Anfahrtsleistung liegt. Jeder Typ von Lokomotiven hat „sein" Diagramm, an dem der Fachmann das Fahrverhalten erkennen kann. Man erkennt weiter an einem solchen Diagramm, daß weder die Leistung noch die Zugkraft, noch die Geschwindigkeit beliebig gesteigert werden können, sondern daß sie eine vom Typ abhängige obere Grenze haben.

Zur Berechnung der Leistung eines Triebfahrzeugs benutzt man oft die Beziehung $P = Fv$. Diese Gleichung gilt nur, wenn die Geschwindigkeit konstant ist. Sie soll jetzt interpretiert werden. Bei konstanter Leistung sind Kraft und Geschwindigkeit indirekt proportional zueinander. Das heißt, daß bei einer höheren Geschwindigkeit eine kleinere Zugkraft entsteht und umgekehrt. Leistung und Zugkraft hingegen sind bei konstanter Geschwindigkeit zueinander direkt proportional. Andererseits erfordert bei konstanter Zugkraft eine höhere Geschwindigkeit auch immer eine erhöhte Leistung. Man sieht schon an diesem einfachen Beispiel, daß eine physikalische Gleichung viele Beziehun-

gen der Realität widerspiegelt. Es kommt darauf an, diese Beziehungen aufzudecken. Dazu dient die Interpretation der Gleichung. Wichtig ist dabei die Angabe aller Bedingungen, unter denen die betreffenden Zusammenhänge gelten.
Bisher haben wir uns vor allem mit ebenen Strecken beschäftigt. Wir hatten unseren Zug lediglich zum Zwecke des Anhaltens einen Berg hinaufrollen lassen. Nun wollen wir uns der Fahrt auf ansteigenden Strecken etwas ausführlicher widmen.
Zuerst untersuchen wir den Fall, daß der Zug auf einer geneigten Ebene steht (Abb. 29). In dieser Abbildung wurde der Zug als Punktmasse betrachtet. Das ist in diesem Zusammenhang zulässig, da uns z. B. die Länge des Zuges jetzt nicht interessiert. Die am Zug angreifende Gewichtskraft F_G wurde in zwei Komponenten zerlegt. Die erste Komponente, die senkrecht auf der geneigten Ebene steht, ist die Normalkraft F_N. Es gilt: $F_N = F_G \cos \alpha$. Die Normalkraft vertritt gewissermaßen bei einer Steigung die Gewichtskraft der ebenen Strecke. Sie ist aber immer kleiner als diese. Die Normalkraft nimmt mit zunehmendem Neigungswinkel ab.

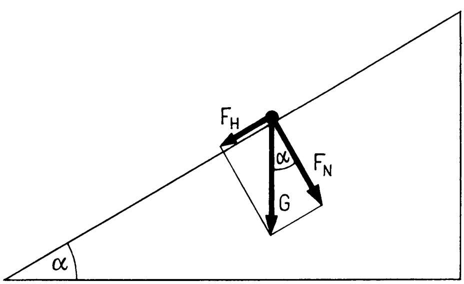


Abb. 29. Geneigte Ebene (statt G lies F_G)

Die zweite Komponente der Abb. 29 ist die Hangabtriebskraft F_H. Sie hat in der horizontalen Ebene keine Entsprechung. Denn es gibt in dieser Ebene keine Kraft, die den Zug ohne die Kraft eines Triebfahrzeugs zu bewegen versucht. Es gilt die Beziehung $F_H = F_G \sin \alpha$. Die Hangabtriebskraft nimmt also zu, wenn der Neigungswinkel wächst. Die Existenz einer solchen Kraft, die den Zug den Hang hinabzutreiben versucht, macht es bei einer Steigung erforderlich, daß schon beim stehenden Zug eine Haftreibungskraft wirkt. Diese kann den Wert $F_{R\,max} = \mu F_G \cos \alpha$ nicht übersteigen. Auch diese Kraft ist kleiner als die entsprechende Kraft der horizontalen Ebene.

Wenn der Neigungswinkel zunimmt, steigt die Hangabtriebskraft, die maximale Haftreibungskraft aber nimmt ab. Wenn diese beiden Kräfte gleich sind – das ist dann der Fall, wenn $\tan \alpha = \mu$ gilt –, beginnt der Zug aus dem Stand zu rutschen. Da das nie geschehen darf, sind der Neigung von Bahnstrecken Grenzen gesetzt (Abb. 30).

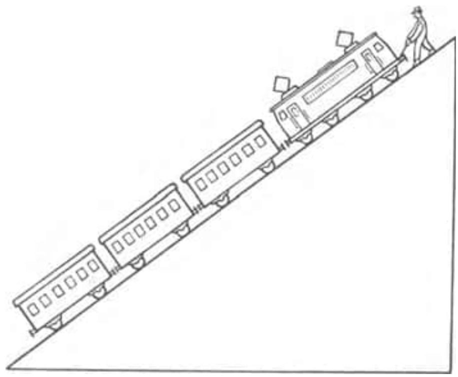


Abb. 30. Der Zug rutscht

Wir untersuchen jetzt den Fall, daß der Zug mit konstanter Geschwindigkeit eine Steigung hinauffährt. Im Sinne der Kinematik handelt es sich um eine gleichförmige Bewegung. Trotzdem muß die Lokomotive eine Zugkraft aufbringen. Denn der Zug muß erstens die Hangabtriebskraft und zweitens den Fahrwiderstand überwinden.

Nehmen wir einmal an, daß unser Beispielzug den in Abb. 31 dargestellten Berg mit einer Geschwindigkeit von $36\,\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ bei einer Fahrwiderstandszahl von 0,002 hinauffährt. Welche Leistung muß die Lokomotive dabei aufbringen? α ist entsprechend der Abbildung gleich 0,29°. Die zu überwindende Hangabtriebskraft beträgt 59,6 kN, die Kraft des Fahrwiderstandes 23,5 kN. Die Gesamtkraft ist also 83,1 kN. Wegen $P = Fv$ erhält man eine Leistung von 0,83 MW. Interessant ist die Feststellung, daß diese Leistung nur 26,7 % der Leistung darstellt, die unser Zug beim Beschleunigen auf horizontaler Strecke aufbringen mußte.

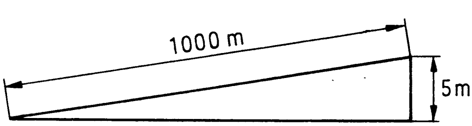


Abb. 31. Steigung

Im dritten Fall soll der Zug beschleunigt einen Berg hinauffahren. Jetzt muß die Lokomotive dreifach Arbeit verrichten. Sie muß die Hangabtriebskraft und den Fahrwiderstand überwinden, und sie muß beschleunigen.
Bei einer Talfahrt wirken auf einen Zug folgende Kräfte: erstens die durch den Fahrwiderstand verursachte Gegenkraft. Diese Gegenkraft ist in diesem Falle hilfreich, denn sie hilft bremsen. Zweitens wirkt aber die Hangabtriebskraft. Ihr muß durch Bremsen entgegengewirkt werden. Wenn die Summe aus Bremskraft und Fahrwiderstand gleich der Hangabtriebskraft ist, wird der Zug mit konstanter Geschwindigkeit den Berg hinabrollen. Will man am Berg halten, muß man die Bremskraft entsprechend verstärken.
Nun taucht eine interessante Frage auf. Wenn der Zug an einer Steigung hält, rollt doch das Ei bei hinreichender Neigung der Strecke auch vom Tisch. Dasselbe gilt, wenn der Zug mit konstanter Geschwindigkeit den Berg hinauf- oder hinabfährt. Haben wir es hier wie in früheren Abschnitten des Buches mit Trägheitskräften zu tun? Wir befinden uns doch aber nicht in einem beschleunigten System, da die Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung konstant bleibt. Diese Kräfte, die hier wirken, sind nicht geheimnisvoll. Wir kennen ihre Ursache genau. Es sind von der Erde verursachte Gravitationskräfte. Denn wir dürfen nie vergessen, daß wir uns bei unserer Reise ständig im Schwerefeld der Erde befinden.
Als wir die Probleme in der horizontalen Ebene behandelten, konnten wir den Einfluß des Schwerefeldes der Erde weitgehend vernachlässigen, da dieses ja senkrecht zum Fußboden und zum Tisch am Fenster wirkte. Diese Voraussetzung ist am Hang nicht mehr gegeben. Unser Tisch ist jetzt, da er parallel zur geneigten Ebene ist, selbst zur Horizontalen geneigt. Die Hangabtriebskraft ist es, die jetzt das Ei rollen läßt. Wenn man das Schwerefeld der Erde ausschalten könnte, würde das Ei auch am Hang auf dem Tischchen am Fenster liegenbleiben. Allerdings würde es in einem solchen Falle schon beim vorsichtigsten Antippen sich gleichförmig geradlinig durch den Raum bewegen und sich bei offenem Fenster u. U. auf Nimmerwiedersehen empfehlen.
Man könnte natürlich auch durch einfache Vorrichtungen in den Zug, der am Hang steht, einen Tisch einbauen, der senkrecht zur Schwerkraft steht, also in diesem Sinne horizontal (Abb. 32). Dieser Tisch wirkt sehr sonderbar in unserem Abteil. Aber eine Kugel oder das Ei würde auf ihm in den betrachteten Fällen ruhig liegenbleiben. In dem Moment aber, wenn der Zug beschleunigt

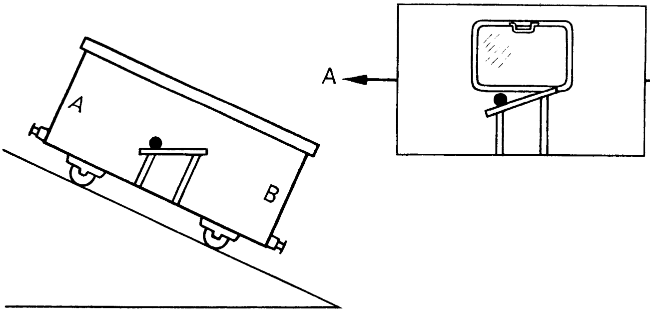


Abb. 32. Horizontaler Tisch am Hang

wird, würde das Ei auch von diesem Tisch rollen, so wie das in einem Nichtinertialsystem durchaus „normal" ist.
Zum Abschluß dieses Kapitels wollen wir uns noch die Frage vorlegen, ob denn ein anfahrender Zug die Rotation der Erde beeinflußt. Müßte nicht ein in Richtung Westen anfahrender Zug die Erdrotation, die ja nach Osten erfolgt, beschleunigen und somit den Tag verkürzen? Er tut es tatsächlich! Denn nach dem Satz von der Erhaltung des Impulses muß die Erzeugung eines Impulses in der einen Richtung einen entsprechenden Gegenimpuls hervorrufen. Man denke nur an das Beschleunigen von Raketen und Raumflugkörpern.
Daß es auch bei einem Zug einen solchen Gegenimpuls gibt, kann uns unser Modellrad zeigen. Setzen wir es nicht auf einen festen Tisch, sondern auf ein lockeres Blatt Papier, so bewegt sich das Papier „nach hinten", wenn wir das Rad drehen (Abb. 33). Noch deutlicher wird die Wirkung veranschaulicht,

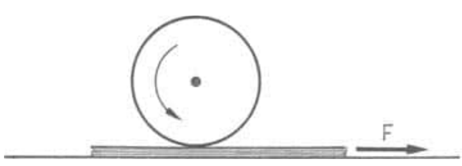


Abb. 33. Kraft auf Unterlage

wenn man eine Spielzeugeisenbahn auf dem Kranz eines drehbar gelagerten Rades fahren läßt (Abb. 34).
Im Prinzip gibt es also diesen Einfluß eines anfahrenden Zuges auf die Erdrotation tatsächlich. Er ist jedoch unmeßbar klein. In

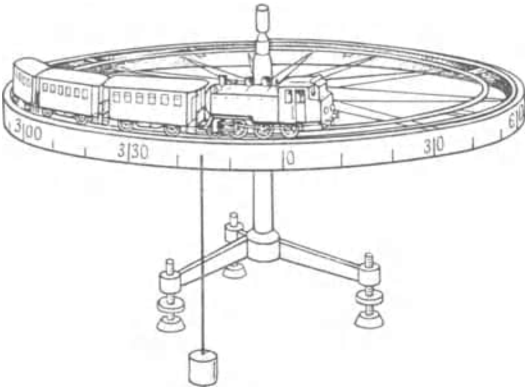


Abb. 34. Impulserhaltung

unserem Beispiel beträgt das Verhältnis Masse Erde zu Masse Zug $5 \cdot 10^{18} : 1$. Dazu kommt, daß im Mittel ebenso viele Züge in östlicher Richtung starten werden wie in westlicher. Schwankungen in der Tageslänge auf der Erde haben andere Ursachen.
Das Kapitel soll ausklingen mit zwei Anmerkungen zu Bezugssystemen. Zuerst sei festgestellt, daß auch die kinetische Energie eine Größe ist, die vom Bezugssystem abhängt. Unser Zug hat zwar in bezug auf die Erde eine hohe kinetische Energie, in bezug aber auf ein Auto, das mit der Geschwindigkeit des Zuges parallel zu diesem fährt, hat er keine kinetische Energie. Das ist deshalb so, weil die relative Geschwindigkeit Null ist. Das merkt man auch schon daran, daß diese Fahrzeuge relativ gefahrlos aneinander andocken könnten. Wie kann die Energie relativ sein, da doch der Energieerhaltungssatz gilt? Das ist kein Widerspruch. Denn die Relativität der Energie bezieht sich auf den Übergang von einem System in ein anderes, während der Energieerhaltungssatz sich nur auf ein System bezieht.
Die zweite Anmerkung bezieht sich auf das Anhalten. Aus der Sicht des Bezugssystems „Zug" kann man den Vorgang so beschreiben, daß durch entsprechende Kräfte erreicht wird, daß sich die Umgebung einschließlich des Bahnhofs in bezug auf den Zug nicht mehr bewegt. Wir können jetzt gefahrlos aus unserem System in das andere hinüberwechseln. „Nicht aussteigen, bevor der Zug hält!"
Wissen wir nun alles über Kräfte im und am Zug? Die Antwort lautet auch jetzt „Nein". Das nächste Kapitel wird neue Kräfte bringen.

Fahrt durch eine Kurve

Wem ist es nicht schon einmal ähnlich ergangen? Man sitzt im Zug in einem der hinteren Wagen und blickt gedankenverloren aus dem Fenster. Plötzlich erschrickt man. Ein anderer Zug kreuzt den Weg. Gibt es einen Zusammenstoß? Dann muß man lächeln, weil man erkennt, daß es der eigene Zug ist, der da „kreuzt".
Aber eigenartig ist es doch, die Lokomotive nach links fahren zu sehen, während man selbst geradeaus fährt und doch von ihr gezogen wird.
Das Beispiel zeigt uns, daß man Kräfte in ihrer Wirkungsrichtung verändern kann. Durch Vermittlung des Gleises wird die Zug-

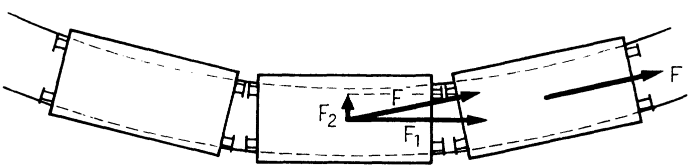


Abb. 35. Kurvenfahrt

kraft unter Veränderung von Betrag und Richtung bis zu uns übertragen (Abb. 35). F_1 ist die Kraftkomponente in Richtung des Gleises. F_1 wird geringer von Wagen zu Wagen in der Kurve. Die Komponente F_2 ist eine Druckkraft auf die innere Schiene. Das ist ganz allgemein so. Wenn man die Richtung einer Kraft verändern muß, verliert man an Betrag der Kraft, und es treten außerdem zusätzliche Komponenten auf. Trotzdem benutzt man solche kraftumformenden Einrichtungen immer wieder. Man hat nichts Besseres.

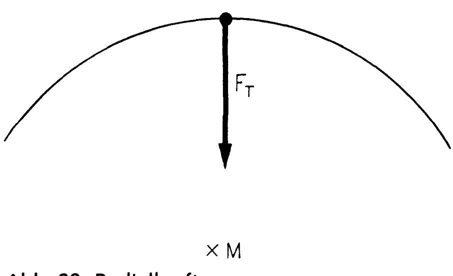


Abb. 36. Radialkraft

Was aber ist die Ursache von einer Kurvenfahrt? Was bringt den Zug vom geraden Weg ab? Die Lokomotive ist es nicht. Sie ist nicht lenkbar. Die Zwangskräfte kommen vom Gleis. Es entsteht eine Radialkraft F_r, die den Zug in die Kurve zwingt (Abb. 36).
Daß die Kräfte, die bei der Kurvenfahrt eines Zuges auftreten, sehr groß sein müssen, kann man daran erkennen, daß der Zug nach Durchfahren des Bogens um 90° oder mehr gedreht worden ist, und das bei diesen großen Massen (Abb. 37). Diese „Wendeenergie" muß die Lokomotive beim Befahren gekrümmter Streckenabschnitte zusätzlich aufbringen.

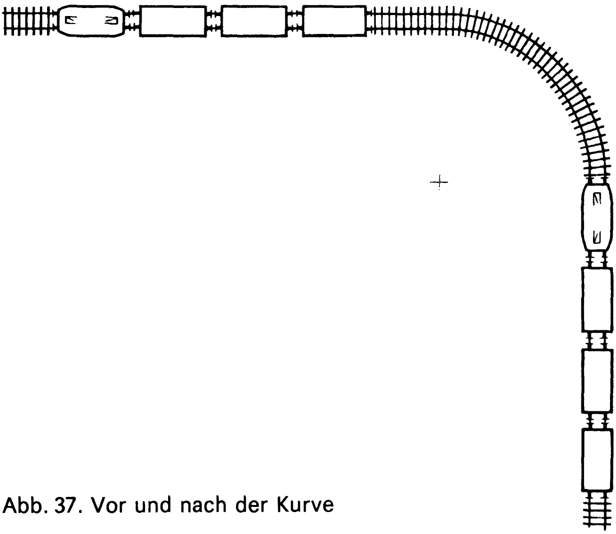


Abb. 37. Vor und nach der Kurve

Nun ist aber jede krummlinige Bewegung eine beschleunigte Bewegung. Das gilt auch dann, wenn der Zug beim Durchfahren des Bogens weder schneller noch langsamer wird, wenn also der Betrag der Geschwindigkeit konstant bleibt. Die Bewegung ist deshalb auf jeden Fall beschleunigt, weil sich mindestens die Richtung der Geschwindigkeit ändert (Abb. 38). Die Geschwindigkeit v_1 hat eine andere Richtung als v_2. Das ist gesichert. Deshalb ist die Bewegung beschleunigt. Ob darüber hinaus noch Veränderungen im Betrag der Geschwindigkeit auftreten, ist für die getroffene Feststellung ohne Belang.
Nehmen wir an, daß der Zug während der Kurvenfahrt seine Geschwindigkeit beibehält. Dann zeigt die beschleunigende Kraft, die Radialkraft F_r, in Richtung des Zentrums des Kreises. Die von

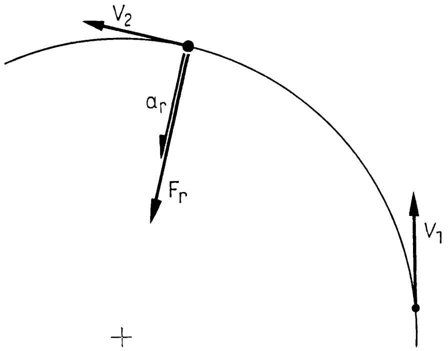


Abb. 38. Die Geschwindigkeit ändert sich

der Radialkraft hervorgerufene Radialbeschleunigung a_r zeigt dann ebenfalls zum Mittelpunkt. Es gilt die Beziehung $a_r = v^2/r$. Daraus folgt sofort die Beziehung für die Radialkraft: $F_r = mv^2/r$. Diese Radialkraft ist also um so größer, je größer Masse und Geschwindigkeit des Fahrzeugs sind. Sie steigt ebenfalls, wenn der Krümmungsradius kleiner wird. Aus bautechnischen Gründen sind deshalb diesen drei Größen Grenzen gesetzt. Es ist festgelegt, bei welchem Radius welche Geschwindigkeit gefahren werden darf.
Betrachten wir ein Zahlenbeispiel. Wenn ein Zug eine Kurve, deren Krümmungsradius 500 m beträgt, mit einer Geschwindigkeit von 80 $km \cdot h^{-1}$ befährt, so muß die Radialbeschleunigung 0,99 $m \cdot s^{-2}$ betragen. Das sind immerhin 10% der Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche. Wenn man die auftretende Radialkraft berechnen will, bezieht man sich am besten auf einen Wagen, weil ja niemals der gesamte Zug gleichzeitig im Bogen ist. Aus der Radialbeschleunigung bestimmt man die Radialkraft durch einfache Multiplikation mit der Masse. So erhält man im Zahlenbeispiel je Tonne Masse eine Radialkraft von 990 N. Auf einen Wagen von 60 t Gesamtmasse muß also unter den angegebenen Bedingungen eine Radialkraft von 59,4 kN wirken. Bei Verkleinerung des Krümmungsradius erhöhen sich diese Werte noch. Diese hohen Kräfte werden von den Schienen erzeugt. Diese sind an den Schwellen befestigt. Die Schwellen liegen jedoch frei auf dem Schotterbett und übertragen alle auftretenden Kräfte auf den Unterbau. Wenn man sich einen Eindruck von der Größe der von einem fahrenden Zug auf die Unterlage ausgeübten Kräfte verschaffen will, so beobachte man

einmal Gleis und Unterbau im Moment der Vorbeifahrt eines Zuges. Man wird erstaunt sein, wie beweglich ein Gleis sein kann.
Da jede Kurvenfahrt beschleunigt ist, stellt ein Zug, der auf gekrümmter Strecke fährt, ein Nichtinertialsystem dar. Deshalb treten in diesem Zug Trägheitskräfte auf, die es bei geradliniger Fahrt nicht gibt. Zwei neue Arten von Trägheitskräften werden wir kennenlernen.
Die erste ist die bekannte Zentrifugal- oder Fliehkraft F_z. Sie ist der Radialkraft dem Betrag nach gleich, jedoch ihr entgegengerichtet. Ein Reisender, der in einem Fahrzeug eine Kurve durchfährt, spürt diese Kraft deutlich. Er wird nach außen gedrückt. In diese Richtung rollt auch das Ei auf dem Tisch am Fenster, und in diese Richtung zeigt auch die Oberfläche unserer Limonade. Wer hat nicht schon beobachtet, daß Reisende in einem Zug oder in einer Straßenbahn beim Gehen oder beim Stehen von einer Kurve überrascht und nach außen geschleudert werden. Das kommt besonders dann vor, wenn sie sich nicht festhalten.
Unser Pendel wird sich infolge der Zentrifugalkraft nach der Außenseite der Kurve neigen. Könnte man dieses Pendel nicht als Geschwindigkeitsmesser benutzen? Wie wir gleich sehen werden, ist das tatsächlich möglich. Das Pendel wird sich nämlich in Richtung der Resultierenden einstellen, die sich aus der Gewichtskraft und der Zentrifugalkraft ergibt (Abb. 39). Für die Berechnung des Winkels α gilt folgende Herleitung:

$$\tan \alpha = \frac{F_z}{G} = \frac{mv^2}{rmg} = \frac{v^2}{rg}.$$

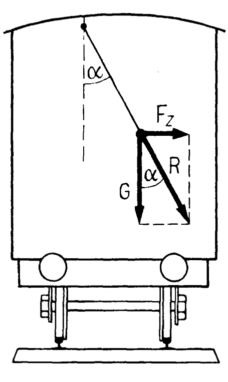


Abb. 39. Pendel in der Kurve

Der Winkel α hängt von v ab. Wenn man r und g kennt, kann man durch das Messen von α die Geschwindigkeit des Zuges bestimmen. Unter diesen Bedingungen kann man das Pendel als Tachometer benutzen. Daß man r immer wieder von Kurve zu Kurve bestimmen muß, leuchtet ein. Aber ist nicht g überall die gleiche Zahl, nämlich $9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$? Die Antwort lautet „Nein". Denn g ändert sich schon auf der Erde. Am Pol ist es infolge der Abplattung der Erde größer als am Äquator. Auf Bergen ist es infolge des größeren Abstandes vom Erdmittelpunkt kleiner als am Meer. Auf dem Mond ist g infolge der kleineren Masse kleiner als auf der Erde, und an einer Stelle der Reise zum Mond ist es Null.

Nehmen wir wieder ein Zahlenbeispiel zur Veranschaulichung. Mit den obigen Zahlen – $r = 500\,\mathrm{m}$ und $v = 80\,\mathrm{km \cdot h^{-1}}$ – ergibt sich mit $g = 9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ für α ein Winkel von 5,75°. Dieser Wert gilt in mittleren Breiten. An einem Erdpol ($g = 9{,}83\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$) würde – vorausgesetzt, man könnte dort mit einem Zug fahren – der Pendelausschlag 5,74° betragen. Am Äquator, wo g gleich $9{,}78\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ ist, ergibt sich ein Winkel von 5,77°. Es wird schon klar, daß sich diese kleinen Differenzen nicht zur Messung von Unterschieden in der geografischen Breite eignen werden. Auf dem Mond allerdings wäre der Ausschlag mit 31,37° deutlich größer. Denn auf dem Mond beträgt die Gravitationsbeschleunigung nur $1{,}62\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$. Auch ein Pendel könnte auf dem Mond größere Sprünge machen als auf der Erde.

Die bei einer Kurvenfahrt auftretenden Zentrifugalkräfte sind bekanntlich dem Betrag nach den großen Radialkräften gleich. Das birgt die Gefahr in sich, daß das Fahrzeug aus der Kurve getragen wird. Sehr oft muß man Meldungen darüber lesen oder hören, daß Autos wegen überhöhter Geschwindigkeit von der

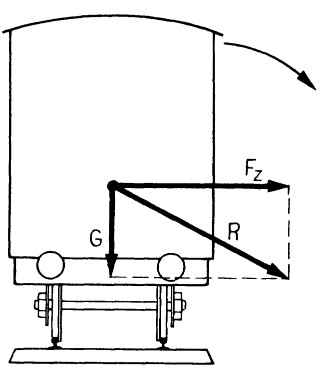


Abb. 40. Kippen

Bahn abgekommen sind. Die Folge davon sind i. allg. sehr schwere Unfälle.
Bei Eisenbahnzügen geschehen solche Unfälle in Kurven nicht so oft. Der Grund dafür ist wohl in der Tatsache zu suchen, daß dem Triebwagenführer bekannt ist, welche Kurve er mit welcher Geschwindigkeit durchfahren darf. Eine solche Information hat der Kraftfahrer nicht.
Jedoch muß der Lokführer die vorgeschriebenen Werte genau einhalten, und man muß besonders in Kurven den Zustand des Bahnkörpers und der Gleise regelmäßig überprüfen.
Ein zu schnelles Durchfahren des Bogens bringt auch für einen Zug Gefahr. Denn die Waggons beginnen zu kippen, sobald die Resultierende aus der Zentrifugalkraft und der Gewichtskraft nicht mehr durch die Grundfläche des Wagens geht (Abb. 40).
Es gibt ein relativ einfaches Mittel, dieser Gefahr zu begegnen. Das ist die Überhöhung der äußeren Schiene, so daß sich eine Schräglage des gesamten Bogenstücks des Gleises ergibt. Diese Methode ist natürlich auch bei Straßen anwendbar.
Die Überhöhung wird so gewählt, daß die Resultierende aus Zentrifugalkraft und Gewichtskraft senkrecht zum Gleis steht (Abb. 41). Für α ergibt sich die aus anderem Zusammenhang be-

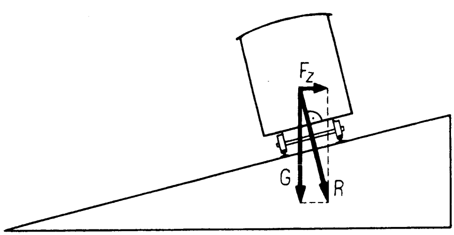


Abb. 41. Überhöhung in Kurven

kannte Beziehung $\alpha = v^2/rg$. Die Gewichtskraft des Zuges ist bekannt. Woher nimmt man aber die Fliehkraft? Nun, man muß eine Geschwindigkeit annehmen, mit der die Kurve im Normalfall durchfahren wird. Wird diese Normalgeschwindigkeit nicht eingehalten, dann spürt der Reisende zusätzliche Kräfte. Fährt der Zug zu schnell, wird er nach außen gedrückt; fährt er zu langsam, rutscht er nach innen. Besonders unangenehm ist es, wenn der Zug in einer überhöhten Kurve halten muß. Man wird regelrecht nach unten rutschen. Man ist froh, wenn die Fahrt fortgesetzt wird. Wird die Kurve mit der vorgesehenen Geschwindigkeit durchfahren, sitzt man so in seinem Polster, als

würde eine gerade Strecke durchfahren. Ein Pendel schlägt in diesem Fall auch nicht aus, sondern behält, weil es sich in Richtung von R einstellt, seine Lage senkrecht zur Decke des Wagens bei.
Wieder wollen wir ein Zahlenbeispiel betrachten. Aus Abb. 41 folgt für den Winkel der Überhöhung dieselbe Gleichung wie bei der Berechnung der Schräglage eines Pendels. Das ist nicht verwunderlich, da sich ja ein Pendel in Richtung der Resultierenden einstellt. Also erhält man auch hier für α den Wert von 5,75°. Wie groß ist unter diesen Bedingungen die Überhöhung h bei einer Spurweite b von 1435 mm (Abb. 42)? Mit $h = b \sin \alpha$

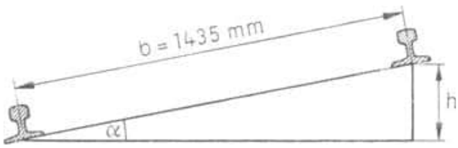


Abb. 42. Berechnung der Überhöhung

erhält man für $h = 0{,}14$ m. Das heißt, daß die äußere Schiene um 14 cm höher liegen muß als die innere. Überhöhungen stellen hohe Anforderungen an die Präzision der Ingenieure und Bauleute. Besonders problematisch sind die Übergänge von der Geraden in den überhöhten Bogen.
In diesem Zusammenhang könnte man die Frage stellen, wie ein Wagen überhaupt durch eine Kurve fahren kann, da doch immer zwei Räder starr auf einer Achse sitzen. Denn es ist doch unbestritten, daß das äußere Rad einen größeren Weg zurückzulegen hat als das innere. Man denke nur einmal zum Vergleich an das

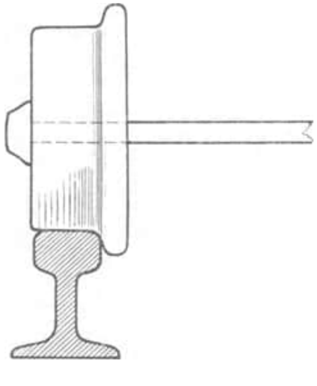


Abb. 43. Spurkranz

Einschwenken einer breiten Marschformation. Die Lösung ist in der Form des Spurkranzes der Räder gegeben (Abb. 43). Infolge der Zentrifugalkraft rutscht bei der Kurvenfahrt das äußere Rad etwas nach außen und damit nach oben. Die Folge davon ist, daß es auf einer Stelle des Spurkranzes abrollt, die einen größeren Durchmesser hat als beim inneren Rad. Deshalb legt jetzt das äußere Rad bei einer Umdrehung einen größeren Weg zurück als das innere.
Folgende Scherzfrage paßt hierher. Gibt es in einem Zug, der von *A* nach *B* fährt, auch Punkte, die sich von *B* nach *A* bewegen? Natürlich sind hier keine Lebewesen gemeint. Auf den ersten Blick scheint das unmöglich zu sein. Bei genauerem Nachdenken findet man die Lösung (Abb. 44).

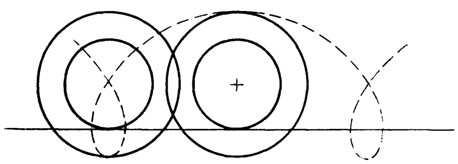


Abb. 44. Bahn eines Punktes des Spurkranzes

Wie oben bereits erwähnt, gibt es in rotierenden Bezugssystemen noch eine zweite Trägheitskraft. Das ist die Corioliskraft. Sie tritt nur auf, wenn sich ein Körper im rotierenden System bewegt. Sie äußert sich immer in einem Abweichen senkrecht zur Bewegungsrichtung. Bei einer Linkskurve tritt eine Rechtsabweichung ein, bei einer Rechtskurve eine Linksabweichung (Abb. 45). Diese Kräfte sind nicht sehr groß. Man kann sie je-

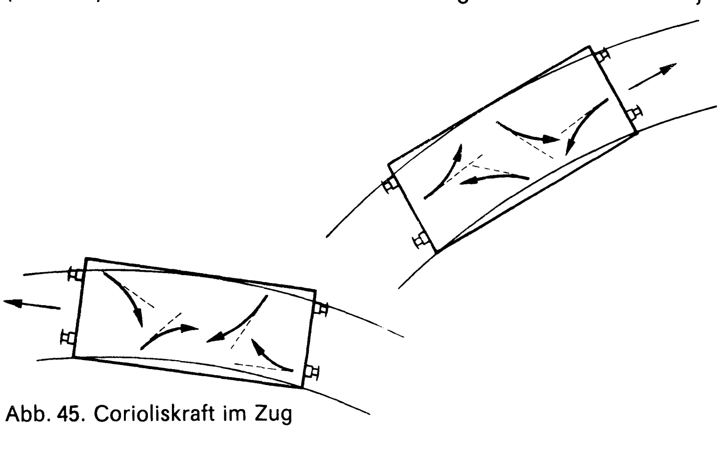


Abb. 45. Corioliskraft im Zug

doch dann feststellen, wenn man sich während des Durchfahrens eines krummlinigen Streckenabschnitts im Zug bewegt und die Zentrifugalkraft durch die Überhöhung des Gleises kompensiert ist.
Durch Kurvenfahrten geht auch eine Erscheinung verloren, die wir bei der Fahrt längs einer Geraden feststellen konnten: Wir meinen die Konstanz der Sonnenrichtung, die sie von den anderen Dingen abhob. Wenn man eine kurvenreiche Strecke durchfährt, kann man beobachten, daß die Sonne in kürzester Zeit mehrfach auf- und untergeht, daß sie von Ost nach West genauso läuft wie von West nach Ost, ja daß sie regelrecht pendelt. Erst wenn sich unser System „Zug" wieder längs einer Geraden bewegt, nimmt die Sonne erneut einen festen Platz ein (Abb. 46).

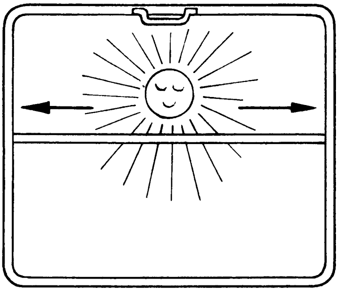


Abb. 46. Pendelnde Sonne

Wir sind mit unserem Zug durch gerade Strecken und durch Kurven gefahren, wir haben Steigungen und Abfahrten überwunden. Jetzt wollen wir mit ihm durch Wind und Wetter fahren.

Witterungseinflüsse

Züge rollen zu jeder Jahreszeit. Das hat eine Reihe von Folgen. Einige davon sollen in diesem Kapitel erörtert werden.
Zuerst beschäftigen wir uns mit Temperatureinflüssen. Die Gleise liegen zu jeder Zeit offen und frei auf dem Unterbau. Da-

mit sind sie allen Witterungseinflüssen unmittelbar ausgesetzt. Das gilt auch für die Wärmeeinstrahlung. Im Sommer können Gleise infolge der Sonneneinstrahlung Temperaturen von 40 °C und mehr annehmen. Im Winter kann die Temperatur auf −25 °C und tiefer absinken. Wir wissen, daß sich feste Körper bei Temperaturschwankungen in ihrer Länge verändern. Bei Erwärmung dehnen sie sich infolge der stärkeren Gitterschwingungen der Moleküle aus, bei Abkühlung ziehen sie sich zusammen. Das ist eine Erscheinung, die die Baumeister aller Zeiten beachten mußten, besonders natürlich, seit Metalle als Baustoff Verwendung fanden. Rollenlager bei Brücken, Dehnungsfugen und Dehnungsausgleicher der verschiedensten Art sind Beispiele dafür.

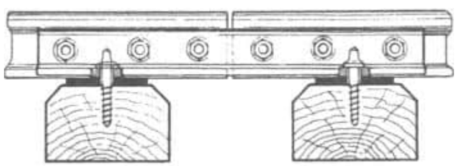


Abb. 47. Schienenstoß

Infolgedessen verlegte man lange Zeit Schienen auf Stoß, d. h., man ließ zwischen den einzelnen Schienen Lücken, die man durch Laschen überbrückte (Abb. 47). Der lineare Ausdehnungskoeffizient für Stahl beträgt $1{,}3 \cdot 10^{-5}\,K^{-1}$. Das bedeutet, daß 1 m Schiene pro Kelvin Erwärmung um 0,013 mm länger wird. Das ist nicht viel. Jedoch bei einer Entfernung von beispielsweise 400 km beträgt die Wärmeausdehnung schon beachtliche 5,2 m pro Kelvin. Wenn man davon ausgeht, daß die Temperatur der Gleise jahreszeitlich bedingt um 65 K schwankt, so ergibt sich eine Längenänderung von 338 m. Deshalb gab es Schienenstöße. Man konnte sie durch das rhythmische Schlagen der Räder deutlich erkennen, im Winter mehr als im Sommer.
Heute allerdings fährt man lange Strecken, ohne einen einzigen Stoß zu spüren. Gilt die Physik nicht mehr? Dehnen sich die Körper nicht mehr aus? Doch, sie gilt noch, sie dehnen sich noch aus. Man hat entdeckt, daß man die Kraft der Längenausdehnung auch bändigen kann, wenn man sie in beherrschbare Spannungen im Gleis umwandelt. Aufgrund dieser Erkenntnis verlegt man heute die Schienen praktisch lückenlos. Das hat zwei Vorteile. Erstens wird die Wartung der Gleise einfacher, denn die Schienenstöße waren die Schwachstellen eines Glei-

ses. Zweitens wird die Fahrt für den Fahrgast viel angenehmer, weil sie ruhiger erfolgt. Das kommt auch den Federn der Wagen zugute.
Wärmeausdehnung gibt es aber nicht nur bei Schienen. Es gibt sie z. B. auch für die Oberleitung elektrischer Bahnen und für die Telegrafenleitungen, die fast jede Strecke säumen. Die Leitungen sind i. allg. aus Kupfer. Der lineare Ausdehnungskoeffizient von Kupfer ist $1{,}6 \cdot 10^{-5}\,K^{-1}$. Das bedeutet, daß bei 100 m Länge und 30 K Erwärmung die Ausdehnung 4,8 cm beträgt. Bei Abkühlung tritt eine entsprechende Verkürzung der Leitungen ein. Wie kann man diese ständige Veränderung der Länge einer Leitung technisch beherrschen?
Bei Telegrafenleitungen ist die Lösung relativ einfach. Man verlegt sie so, daß sie bei der tiefsten Temperatur, die am betrachteten Ort noch denkbar ist, fast straff hängt. Infolge der Längenausdehnung hängt sie im Sommer mehr durch als im Winter (Abb. 48). Es ist für den Fahrgast durchaus angenehm, im Vorbeifahren das Auf und Ab der Leitungen zu beobachten.

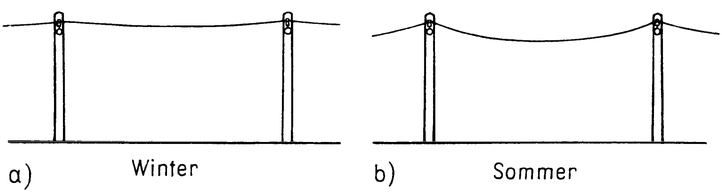


Abb. 48. Leitungen

Anders liegen zweifellos die Verhältnisse bei der Oberleitung elektrischer Bahnen. Ein Durchhängen dieser Leitung ist nicht möglich, da es Gefahren für den Zugverkehr durch Verwickeln von Leitungen und Stromabnehmer mit sich bringen würde. Leitungsrisse wären wahrscheinlich. Der Fahrleitungsdraht muß immer straff gespannt sein. Wie ist das bei sich ständig ändernder Leitungslänge möglich?
Man löst das Problem, indem man die Leitung in Teilstücke zerlegt und diese einzeln spannt. Zu diesem Zweck führt man die Enden dieser Teilstücke seitlich heraus zu Masten, an denen sich Spannvorrichtungen befinden (Abb. 49). Man nutzt dabei die Schwerkraft aus. Wird die Leitung länger, so sinken die Massestücke, anderenfalls steigen sie. So bleiben die Oberleitungen immer straff gespannt. Man kann so leicht die Fahrleitungsdrähte im Gewirr der Leitungen erkennen, wenn man aus dem

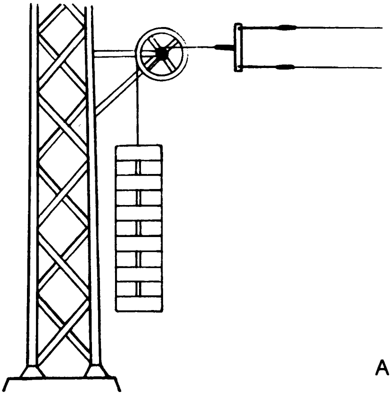


Abb. 49. Spannvorrichtung

Fenster schaut. Diese Drähte schwingen, weil sie straff gespannt sind, nicht mit. Übrigens sind sie i. allg. auch stärker als andere Leitungen.
Wenn man aber die Oberleitung in Teilstücke zerlegt, muß man dafür sorgen, daß der Stromabnehmer ohne Komplikationen von Teilstück zu Teilstück weitergereicht wird. Das geschieht, indem man dafür sorgt, daß sich alter und neuer Draht über dem Gleis kreuzen (Abb. 50). So kann man während der Fahrt beobachten, wie in bestimmten Abständen von der Seite ein neues Teilstück von einem Mast mit Spannvorrichtung herangeführt wird und kurz danach das „alte" Teilstück seitlich in Richtung auf einen solchen Mast verschwindet. Diese Übergabe erfolgt im Mittel etwa nach 12 bis 13 Leitungsmasten. Auf die Oberleitung elektrischer Bahnen werden wir im nächsten Kapitel zurückkommen.

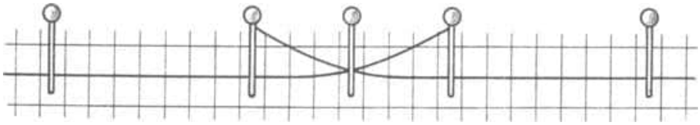


Abb. 50. Treffpunkt der Leitungsstücke

An kühlen Tagen hat man oft Schwierigkeiten, wenn man aus dem Fenster sehen will. Die Scheiben sind beschlagen. Das ärgerliche Wegwischen nützt auch nur für kurze Zeit. Die Scheiben beschlagen erneut. Woher kommt bloß das viele Wasser, und warum schlägt es sich ausgerechnet am Fenster nieder?
Nun, das Wasser stammt aus der Luft im Abteil. Denn in der Luft

befinden sich durchschnittlich 1,2% Wasserdampf, wobei dieser Anteil stark schwankt. Dieser Wasserdampf in der Luft ist lebensnotwendig. Er ist unsichtbar.
Nun ist es so, daß die Luft bei einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen kann. So kann sie bei 4 °C $6{,}4\,g \cdot m^{-3}$ und bei 20 °C $17{,}3\,g \cdot m^{-3}$ Wasserdampf aufnehmen. Je tiefer die Temperaturen sind, desto weniger Wasserdampf kann aufgenommen werden. Wird der höchstmögliche Gehalt an Wasserdampf erreicht, so beginnt die Luft, das Wasser auszuscheiden. Die entsprechende Temperatur nennt man Taupunkt τ. Die Wassermengen sind nicht unerheblich.
So werden in einem Raum von $250\,m^3$ Volumen und einer Luftfeuchtigkeit von 75% 1465,6 g Wasser ausgeschieden, wenn sich die Luft von 19 °C auf 4 °C abkühlt.
Das Beschlagen der Scheiben entsteht dadurch, daß die Glasfläche des Fensters durch Abkühlung von außen kälter als die Luft im Wagen wird. Diese kommt mit dem kalten Fenster in Berührung, kühlt sich dabei unter den Taupunkt ab, und das ausgeschiedene Wasser beschlägt die Scheibe. Dieser Prozeß wiederholt sich so lange, wie durch Abkühlung der Luft der Taupunkt immer erneut erreicht werden kann.
Warum aber beschlägt die Scheibe nicht von außen? Dafür kann man zwei Gründe anführen. Erstens ist die Temperaturdifferenz zwischen Fenster und Außenluft sehr gering, und zweitens ist die Luftfeuchtigkeit im Abteil immer größer als draußen. Das ist deshalb so, weil jeder Fahrgast durch Transpiration zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Abteil beiträgt. Aus diesem Grund ist es nützlich, das Fenster zu öffnen. Durch Ausgleich der Luftmassen sinkt die Feuchtigkeit im Abteil – oder im Auto –, und das Beschlagen der Scheiben läßt nach.
Die Erscheinung der Kondensation des Wasserdampfes aus der Luft ist natürlich nicht nur an den Scheiben eines Zuges zu beobachten. Man denke nur an den Tau, der durch die nächtliche Abkühlung der Erdoberfläche entsteht und der in Mitteleuropa immerhin 2% des Gesamtniederschlags ausmacht.
Wenn bei Fahrten im Winter die Temperaturen unter 0 °C absinken, erstarrt das Kondenswasser, und es bilden sich an der Fensterscheibe die bizarren Figuren der Eisblumen. Jetzt ist das Hinaussehen noch schwieriger geworden. Dafür aber bieten die Eisblumen der Phantasie die Möglichkeit, ihre Gebilde auf vielfältige Weise zu deuten.
Es gibt aber noch eine andere Form festen Niederschlags. Wir

meinen den Reif, der uns manchmal an kalten Wintermorgen überrascht. Hier handelt es sich um ein Sublimat, d. h., der Wasserdampf ist direkt in die feste Form übergegangen. Es hat ja auch i. allg. in einem solchen Fall in der Nacht weder geregnet noch geschneit. Reif gibt es auch am Zug, an Teilen der Lokomotive, an Puffern und Rädern. Reif an Oberleitungen kann gefährlich werden.

Natürlich beschlagen nicht nur Fenster, sondern alle kühlen, glatten Flächen. Man beobachte nur einmal die Autos, die die Nacht über im Freien gestanden haben, am nächsten Morgen.

Plötzlich beginnt es zu regnen. Wir bemerken es zuerst an den Spuren der Regentropfen an der Scheibe des Fensters. Diese Spuren können uns vielerlei Auskünfte geben. Wenn wir diese Spuren näher betrachten, stellen wir fest, daß sie aus mehreren Einzeltröpfchen bestehen, die längs einer Geraden angeordnet sind (Abb. 51). Wieso bilden sich eigentlich Tropfen, und wieso

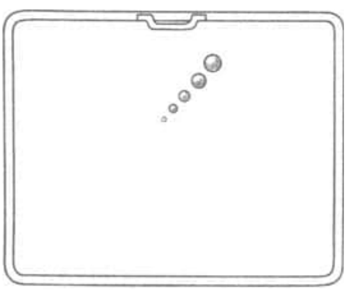


Abb. 51. Regenspur

haften diese Tropfen auf der Scheibe? Tropfen entstehen infolge der Oberflächenspannung, die die Oberfläche einer Flüssigkeit zu minimieren versucht. Und die Kugel hat bei gegebenem Volumen die kleinste Oberfläche. Fallende Tropfen verformen sich natürlich etwas infolge des Luftwiderstandes.

Zweitens spielen Fragen der Benetzung eine Rolle. Wenn eine Flüssigkeit auf einen festen Körper gelangt, bilden sich infolge des Wirkens zwischenmolekularer Kräfte und der Oberflächenspannung bestimmte Kontakt- oder Randwinkel φ heraus (Abb. 52). Ist der Randwinkel kleiner als 90°, spricht man von Benetzung, anderenfalls von Nichtbenetzung. Im Falle der Nichtbenetzung bleiben deutliche Tropfen bestehen, wie das z. B. bei Quecksilber der Fall ist. Im Idealfall der vollständigen Benetzung hingegen fließen die Tropfen völlig auseinander und bilden auf der Oberfläche des festen Körpers eine Flüssigkeitshaut, die infolge der Adhäsionskräfte haftet. So benetzt z. B. Wasser eine reine Glasplatte vollständig. Klarsichtmittel für Frontscheiben von Fahrzeugen enthalten Netzmittel, die die sichtstörende Tröpfchenbildung vermindern sollen.

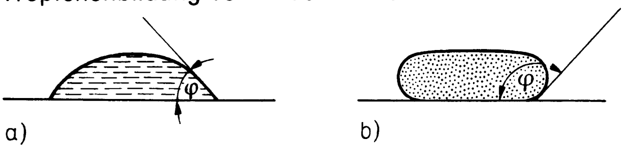


Abb. 52. Benetzung

Wenden wir uns erneut der Fensterscheibe in unserem Abteil zu. Für uns ist es ein Glück, daß diese Scheibe nie völlig sauber ist. Denn nur so können wir Tropfen beobachten.
Zuerst einmal nehmen wir an, daß der Zug steht. Die fallenden Regentropfen treffen auf die Scheibe und bleiben infolge der Adhäsion auf ihr haften. Da sie auf ein ruhendes System treffen, werden sie plötzlich stark abgebremst. Einige Tropfen zerreißen in kleine Tröpfchen. Die größeren Tropfen bleiben erhalten und bahnen sich an der Scheibe ihren Weg. Ein solcher Tropfen bewegt sich zickzackförmig. Manchmal stoppt er für einen Moment, dann wieder folgt er bereitwillig den Spuren, die frühere Tropfen schon gegraben haben. Mit einiger Phantasie kann man sich das Entstehen von Flüssen vorstellen (Abb. 53).

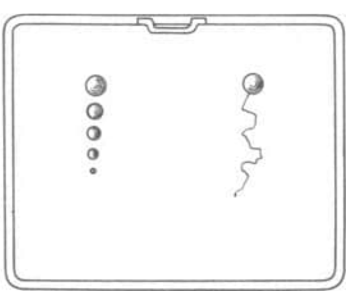


Abb. 53. Der Zug hält

Wenn der Zug fährt, entsteht ein anderes Bild (Abb. 54). Die Tropfen zerreißen und bilden zueinander parallele Linien. Hier wirken Trägheitskräfte, denn der auftreffende Tropfen wird auf jeden Fall beschleunigt, auch wenn der Zug mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Denn der Tropfen hatte während des Fallens keine oder nur eine kleine Geschwindigkeitskomponente in Fahrtrichtung des Zuges. Diese Trägheitskraft F_T wird um so grö-

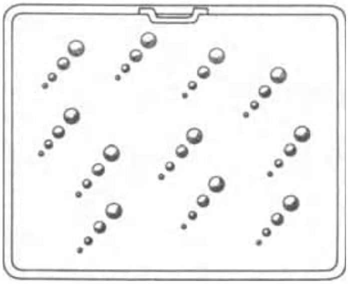


Abb. 54. Der Zug fährt

ßer sein, je schneller der Zug fährt. Da die Tropfen Linien in Richtung der Resultierenden aus Gewichtskraft und Trägheitskraft bilden, kann man das Tropfenbild am Fenster zur Feststellung von Geschwindigkeitsänderungen nutzen (Abb. 55). Mehr Geschwindigkeit hat zur Folge, daß sich die Spuren mehr der Waagerechten annähern.

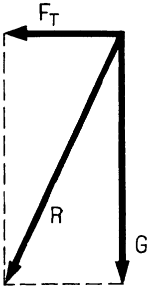


Abb. 55. Richtung der Tropfen

Wie ist dann aber ein Spurenbild zu erklären, wie es Abb. 56 zeigt? Die Antwort ist wie bei jeder Scherzfrage einfach. Der Zug hat zwischendurch auf freier Strecke oder auf einem kleinen Bahnhof gehalten, und es herrscht etwas Wind.

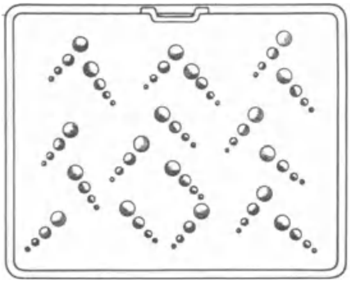


Abb. 56. Zweifache Spuren

Auf einige Witterungseinflüsse bei einer Reise können wir nur kurz verweisen. Das Fahren in der Dunkelheit verlangt eine Beleuchtung in den Wagen. Diese erfolgt heute ausschließlich elektrisch. Jeder Wagen hat seine Lichtmaschine, die von den Rädern angetrieben wird. Bei Halt oder langsamer Fahrt wird automatisch auf Batterie umgeschaltet. Bis weit in unser Jahrhundert hinein erfolgte die Beleuchtung der Züge mit Gas – eine aufwendige und gefährliche Methode. Die Züge mußten Gasbehälter mitführen, die in bestimmten Abständen auf den Bahnhöfen nachgeladen wurden.
In der kalten Jahreszeit müssen die Reisewagen geheizt werden. Daß bei Dampflokomotiven der ohnehin vorhandene Dampf zur Heizung genutzt wurde, ist einleuchtend. Wie aber heizen Diesel- und Elektroloks? Sie haben Heizkessel eingebaut oder führen sie mit. Deshalb überwiegt auch heute noch die Dampfheizung. Daneben gibt es bei elektrischem Bahnbetrieb und bei Diesellokomotiven auch elektrische Wagenbeheizung.
Reisen sind heutzutage in jeder Jahreszeit möglich. Reisen im Winter müssen nicht unangenehmer sein als Sommerreisen.

Blicke aus dem letzten Wagen

Reisewagen haben an ihren Enden Glastüren. Das ermöglicht, aus dem letzten Wagen eines Zuges nach hinten zu blicken. Man ist dann eine Art Anti-Lokomotivführer. Er sieht die Landschaft auf sich zurasen, von uns fliegt sie weg und wird immer kleiner. Auch die Größe ist relativ (Abb. 57).
Die Gegenstände, die nach hinten enteilen, entfernen sich räumlich und damit auch zeitlich. Denn je weiter ein Gegenstand von uns entfernt ist, desto später treffen die Informationen vom Gegenstand bei uns ein. Denn Informationen können sich nicht schneller fortpflanzen als das Licht. Wenn der Körper unseren Standort im letzten Wagen passiert, sehen wir sein gegenwärtiges Bild. Ist er aber schon etwas entfernt von uns, empfangen wir seine Informationen erst dann, wenn das Licht die Entfernung zwischen ihm und uns überbrückt hat. Diese Zeitdifferenz

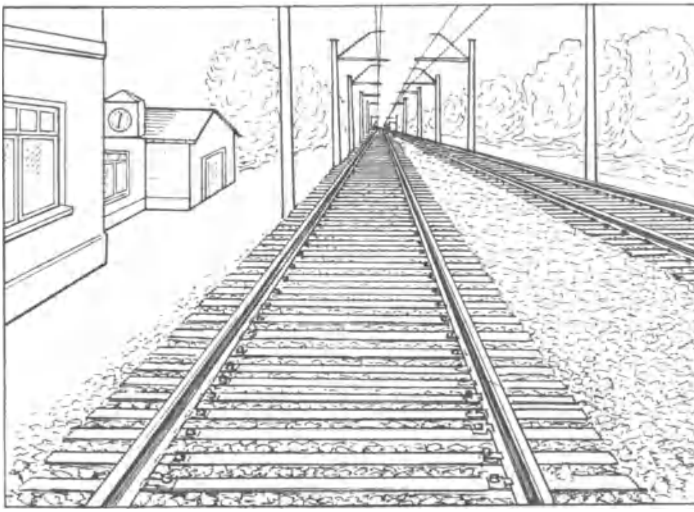


Abb. 57. Blick aus dem letzten Wagen

wird immer größer, je länger wir einen Körper mit unseren Blikken nach hinten verfolgen. Das unterscheidet uns vom eigentlichen Lokomotivführer. Er sieht die Gegenstände kommen. Für ihn werden die betrachteten Zeitabstände immer kleiner.
Natürlich haben diese Zeitabstände für Entfernungen auf der Erde nur prinzipielle Bedeutung. Meßbar sind sie für uns nicht. Bei astronomischen Untersuchungen des Weltalls jedoch muß man sich immer der Tatsache bewußt sein, daß Informationen, die aus großen Entfernungen kommen, zugleich Informationen aus weit zurückliegenden Epochen des Weltalls sind.
Da z. B. das Licht 8,3 min braucht, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, haben wir keine Information von unserem Zentralgestirn, die jünger als diese 8,3 min ist. Ja es ist sogar so, daß die Information über eine hypothetische Zerstörung der Sonne die Erde auch erst nach 8,3 min erreichen würde. In der Zwischenzeit würde auf der Erde alles normal weiterlaufen, als wäre die Sonne noch vorhanden.
Nach diesem kleinen Exkurs in die Astronomie schauen wir wieder aus dem letzten Wagen nach hinten. Wir sehen deutlich, daß die Schienen eines Gleises nach hinten zusammenlaufen. Wir wissen, daß das am Abnehmen des Sehwinkels trotz gleichbleibendem Abstand liegt (Abb. 58). Wir fragen uns nur, warum

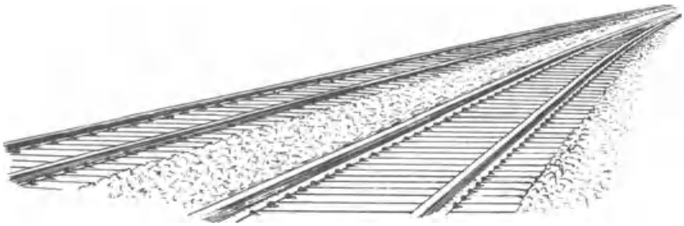


Abb. 58. Parallelen

das besonders bei Schienen so ist. Das fällt bei Gleisen deshalb so auf, weil man hier zwei Geraden hat, die über große Entfernungen parallel zueinander verlaufen. Dieses Zusammenlaufen gilt aber für alle Parallelen. Natürlich gilt das auch für den Zug, dem wir soeben begegneten. Je weiter er sich von uns entfernt, desto schmaler und niedriger wird er (Abb. 59).

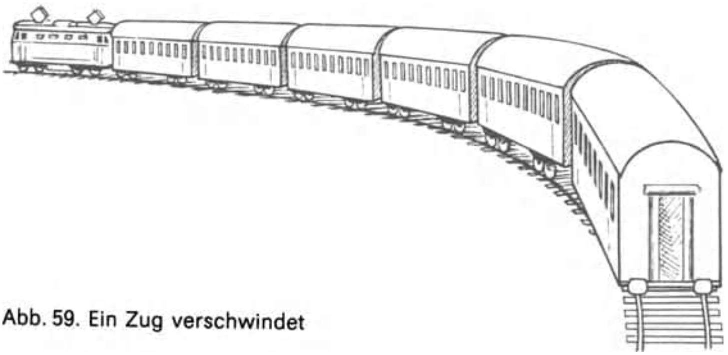


Abb. 59. Ein Zug verschwindet

Da war noch etwas Merkwürdiges, als der Zug vorbeifuhr. Die Lokomotive pfiff gerade. Wir wissen, daß dieser Pfeifton eine konstante Höhe hat. Trotzdem hörten wir deutlich, daß er beim Annähern der Lokomotive höher wurde, im Moment des Passierens umschlug, um dann wieder tiefer zu werden, als sich der andere Zug entfernte. Das war ein Beispiel für den Doppler-Effekt. Er besagt, daß sich die vom Beobachter wahrgenommene Frequenz einer Welle verändert, wenn sich Quelle und Beobachter relativ zueinander bewegen. Die Frequenz wird erhöht, wenn sich der Beobachter auf die Quelle zubewegt, anderenfalls wird sie erniedrigt. Wenn die Relativgeschwindigkeit v klein gegen die Geschwindigkeit c der Welle ist, kann man mit guter Näherung mit der Gleichung $f' = f_0(1 \pm v/c)$ arbeiten. Dabei gilt das Pluszeichen bei Annäherung.

Nehmen wir ein Zahlenbeispiel aus der Welt des Schalls. Die Schallgeschwindigkeit betrage $340\,m \cdot s^{-1}$, die Relativgeschwindigkeit zwischen Beobachter und Quelle $34\,m \cdot s^{-1}$. Die Schallquelle erzeugt einen Ton von 360 Hz (Hertz) Frequenz. Bei Annäherung ergibt sich aus der Gleichung eine Frequenz von 396 Hz, während beim Entfernen eine Frequenz von nur 324 Hz gehört wird. Das Umschlagen von 396 auf 324 Hz ist deutlich zu hören.

Beim Doppler-Effekt ist ein Abstecher in die Astronomie nahezu obligatorisch. Die spektrale Untersuchung des Lichtes, das von den Sternen zu uns gelangt, ergab eine Verschiebung der Spektrallinien in Richtung größerer Wellenlängen, also zum roten Ende des Spektrums hin. Daher kommt auch der populäre Name Rotverschiebung. Größere Wellenlänge λ bedeutet entsprechend der Grundgleichung der Wellenlehre $c = \lambda f$ eine Verringerung der Frequenz, da ja c als Vakuumlichtgeschwindigkeit konstant ist. Eine Verkleinerung der Frequenz ist aber nach dem Doppler-Effekt gleichbedeutend mit dem Entfernen der Lichtquelle vom Beobachter. Streben etwa alle Sterne von uns weg?

Heute gilt als gesichert, daß wir in einem expandierenden Kosmos leben, in dem von jeder Galaxis aus alle anderen Galaxien sich von ihr entfernen. Gegenwärtig vertreten viele Astronomen die Theorie des Urknalls. Im Moment des Urknalls begann das All, das eine unendlich hohe Dichte hatte, zu expandieren. Durch Zurückrechnen vom heutigen Zustand kam man auf ein Weltalter von etwa 18 Mrd. Jahren. Man kennt bereits Objekte, die bis zu 15,2 Mrd. Lichtjahre von uns entfernt sind. Informationen, die wir von dort erhalten, sind also vor mehr als 15 Mrd. Jahren ausgesandt worden. Also hat es diese Objekte – es sind Radiogalaxien – zu dieser Zeit schon gegeben.

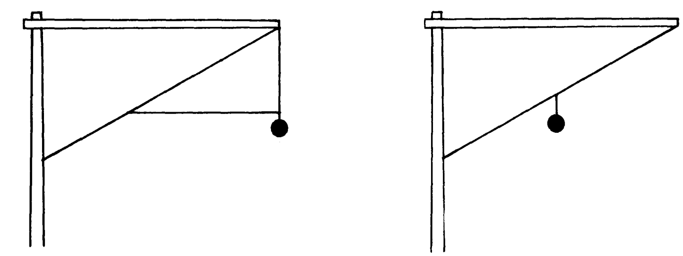


Abb. 60. Befestigung des Fahrdrahts

Kehren wir nach diesem Gedankenflug zurück zur Erde und zum letzten Wagen. Unser Blick fällt rein zufällig auf die Oberleitung. Doch was ist das? Die Leitung torkelt von rechts nach links. Sie führt einen regelrechten Zickzacktanz auf. Fast könnte man vermuten, sie habe zu tief ins Glas geschaut. Weit gefehlt, das ist so gedacht. Davon können wir uns überzeugen, wenn wir die unterschiedlichen Arten der Aufhängung des Fahrdrahts an den Masten näher betrachten (Abb. 60). Benötigt man dadurch aber nicht mehr Kupfer? Ja, das stimmt. Aber nur so kann man die Wirkung des Abriebs verringern. Würde die Leitung längs einer Geraden verlegt, so würde sie immer dieselbe Stelle des Stromabnehmers berühren.
An dieser Stelle wären die Kohlebürsten durch den Abrieb bald unbrauchbar. Denn der Stromabnehmer muß fest gegen die Leitung gedrückt werden, weil anderenfalls eine unerwünschte Funkenbildung entstehen würde. Stromabnehmer und Kohlebürsten aber sind teuer. Durch das Verlegen der Oberleitung im Zickzack wird der Abrieb auf die ganze Breite verteilt und die Lebensdauer der Kontakte verlängert (Abb. 61).

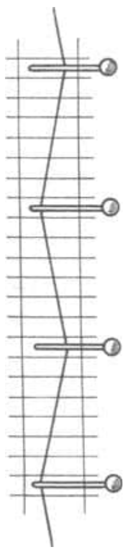


Abb. 61. Zickzack

Im Zurückgehen zu unserem Platz fällt unser Blick auf die Masten, die die Oberleitung tragen. Müssen die Tragarme eigentlich viel aushalten? Eine Kraftzerlegung wird uns die Frage be-

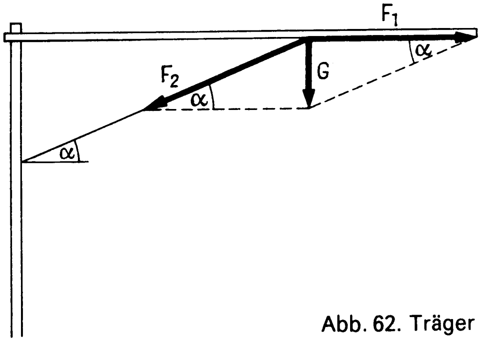


Abb. 62. Träger

antworten helfen (Abb. 62). Schon optisch wird deutlich, daß die beiden Komponenten F_1 und F_2 deutlich größer als die Gewichtskraft G sind. F_1 ist eine Zugkraft, F_2 eine Druckkraft. Aus der Abbildung kann man die folgenden Beziehungen entnehmen: $F_1 = G/\tan\alpha$; $F_2 = G/\sin\alpha$. Für α gleich 30° z. B. sind beide Komponenten größer als G, F_1 um das 1,73fache und F_2 um das 2fache.

Schlußgedanken

Wer hätte gedacht, daß die Physik ein so angenehmer Reisebegleiter sein kann. Die Fahrt gab viele Anregungen. Der Zug bewährte sich als rollendes Labor. Wie schwer war es doch, sich in das System „Zug" zu versetzen und von ihm aus die Dinge zu betrachten. Das Büchlein half uns. Oft konnte es nur Anregungen geben, sich in weiterführender Literatur zu informieren. Das gilt insbesondere in Fragen der modernen Physik und der Astronomie. Fast ist es schade, daß der Zug schon hält. Diese Reise ist zu Ende. Die letzte war sie nicht.

Sachverzeichnis