

Unerwartete Phänomene bei rotierenden Objekten

H. Joachim Schlichting

Im Innern ist ein Universum auch.

Johann Wolfgang von Goethe

Rotationseffekte sorgen häufig für Überraschungen

Obwohl wir auf einem in mehrfacher Weise rotierenden Planeten wohnen, haben wir wenig Erfahrung mit typischen Rotationseffekten: Das zeigen die vor allem körperlichen Überraschungen, die man in Karussells und anderen relativ schnell bewegten Objekten erleben und - von Schwindelgefühlen und anderen unangenehmen Begleiterscheinungen einmal abgesehen - genießen kann. Selbst beim Prellen eines harmlosen Flummis zeigt sich die mangelnde Erfahrung, wenn unsere bei normalen Bällen bestens bewährten Fangkünste (= intuitive Fähigkeit, die Bewegungsgleichung des Balls "im Fluge" zu integrieren), zu hilflos erscheinenden, meist wenig erfolgreichen Fangversuchen geraten.

Auch die physikalische Behandlung von Rotationsproblemen in Schule und Hochschule kann manchmal eher zum "Rotieren" von Lehrern und Schülern führen als zu angemessenen Vorhersagen. Um den gesunden Menschenverstand und die physikalische Intuition ein wenig auf die Probe zu stellen, eignen sich meiner Erfahrung nach einfache Freihandversuche, von denen hier einige skizziert werden sollen.

Gleich schwer heißt nicht immer gleich "träge"

Was bei Translationsbewegungen selbstverständlich erscheint, nämlich die Gleichheit von Schwere und Trägheit, kann bei Rotationsbewegungen zu Problemen führen, wenn man hier einmal das Trägheitsmoment als phänomenologische Entsprechung zur Trägheit nimmt.

Um das zu zeigen, veranstalten wir einen Schnelligkeitswettbewerb zwischen äusserlich gleichen, insbesondere gleich schweren Zylindern, die wir auf einmal oder paarweise eine schiefe Ebene herunterrollen lassen (siehe Abb. 1. Als Zylinder eignen sich z.B. leere Kleinbildfilm Dosen, die man entsprechend präpariert, siehe unten.) Sehr zum

Erstaunen von Zuschauern, denen man mit einer Waage vorher die Gleichgewichtigkeit der Zylinder gezeigt hat, gelangen alle unterschiedlich schnell ans Ziel. Anders als beim Pferderennen ist

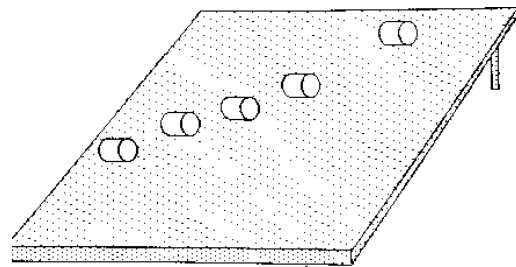


Abb. 1 Der Wettlauf der Zylinder.

Abb.1: Der Wettlauf der Zylinder

die Sympathie jedoch eindeutig bei den beiden langsamsten Zylindern, von denen der eine in einem gleichmäßigen Schneckentempo die Bahn absolviert und der andere nach einigem hektischen Hin- und Herschwingen schließlich den Parcours verweigert.

Eine allgemeine Lösung des Problems ist schnell bei der Hand: Für die gezeigten Phänomene kann nur das Innenleben der Zylinder verantwortlich gemacht werden ("Im Innern ist ein Universum auch." Goethe). Die Geschwindigkeitsunterschiede kommen offenbar durch eine (bis auf die Ausnahme des Verweigerers) rotationssymmetrische Schichtung unterschiedlich dichter Materialien zustande. Allerdings werden zuweilen Zweifel geäußert, ob diese Erklärung auch für den ganz langsamen Zylinder gilt. Man hat das Gefühl, daß dieser durch irgendeinen Mechanismus gebremst wird.

Zur Präparation der Dosen: Die Herstellung der verschiedenen Zylinder ist nicht schwer. Die Demonstrationen sind also echte Freihandversuche: Nicht nur die Durchführung der Versuche ist "freihand" möglich, sondern auch deren Vorbereitung.

Wir haben - wie gesagt - gute Erfahrungen mit leeren Kleinbildfilm Dosen gemacht, die man in

Fotogeschäften häufig in - die Phantasie zu weiteren Versuchen beflügelnden - Mengen erhält. Da die Dosen meist schwarz sind, stellen sie überdies von selbst Black Boxes dar. Diese Filmdosen werden nun mit unterschiedlichen Füllungen gleicher Masse versehen. (Eine Gesamtmasse von 35g erwies sich für die von mir benutzten Zylinder als optimal).

Die Füllungen bestanden im einzelnen aus

a. einem Knetgummikern und darumgelegter Styroporschale,

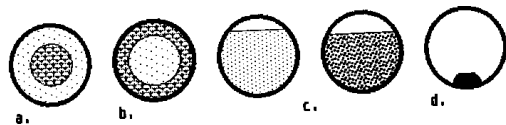


Abb.2: Innenleben der Dosen (siehe Text).

b. einem Styroporkern und darumgelegter Knetgummischale,

c. aus "fluiden" Materialien und

d. einem exzentrisch fixierten Stück Blei (siehe Abb. 2).

Da der Deckel der Filmdosen einen etwas größeren Durchmesser hat als der Dosenkörper, empfiehlt es sich im Hinblick auf Spurstabilität und Leichtläufigkeit, den Boden der Dose sorgfältig mit einer scharfen Klinge herauszuschneiden und mit einem zweiten Deckel zu versehen. Bei sorgfältiger Durchführung ist diese Seite dann genauso wasserdicht wie die andere.

Zu a: Man kleide die Innenwand der Dose mit einem etwa 4mm starken Styroporstreifen aus. Seine Länge schätzt man durch vorheriges Abrollen der Dose ab. Jetzt wird ein kleiner Klumpen Knetgummi, (dessen Masse wie gesagt so bemessen ist, daß er zusammen mit der Dose 35 g wiegt), zu einem Zylinder von der Länge der Dose geformt, und in dem verbliebenen zentralen Hohlraum fixiert. Anschließend wird die Dose von beiden Seiten verdeckelt.

Zu b: Man geht wie in Fall a. vor und vertauscht nur Knetgummi und Styropor : Das vorher abgewogene Knetgummi wird zu einem passenden Streifen ausgerollt und das Styropor zu einem kleinen Zylinder aufgerollt.

Zu c: Die einfachsten "fluiden" Füllungen sind Wasser und feiner Sand. (Am besten eignet sich z.B. beim Fliesenleger erhältlicher Quarzsand mit einer feinen Körnung).

Zu d: Ein auf 35 g zurechtgeschnittener schmaler Bleistreifen wird an der Innenwand der Dose fixiert.

Nach diesen Hinweisen liegt der Erklärung für die unterschiedlichen "Rennleistungen" auf der Hand: Am schnellsten ist die Dose mit dem Styropormantel an der Innenwand. Denn sie besitzt das kleinste Trägheitsmoment. Sie wird dicht gefolgt von dem fast homogenen, mit Wasser gefüllten Zylinder. Deutlich langsamer ist die mit Knetgummi ausgemantelte Dose. Am langsamsten ist die mit Sand gefüllte Dose. Sie ist sogar langsamer als eine sehr viel leichtere leere Dose: Durch die Drehung wird der Sand durchgewalzt, und aufgrund dieser Art innerer Reibung geht ein erheblicher Teil der Energie für die Rotation verloren. Der mit Blei versehene Zylinder bleibt stehen, weil die verfügbare potentielle Energie nicht ausreicht, das Blei einen Dosendurchmesser hoch zu heben. Man bringt ihn auch nicht durch Erhöhung der potentiellen Energie aufgrund einer größeren Neigung der schiefen Ebene zum Rollen. Er fängt vorher an zu gleiten. Dieser Zylinder fordert zu weiteren Versuchen heraus: Beispielsweise könnte man die Bleimasse systematisch verringern bis zu dem "kritischen Punkt", an dem der Zylinder gerade anfängt zu "rollen".

Die optimale Größe, Neigung und Oberflächenbeschaffenheit findet man am besten experimentell heraus. Da die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Zylindern a., b. und c. nicht besonders groß sind, hängt ein einwandfreies Ergebnis von einem möglichst gleichzeitigen Start der Zylinder ab. Er gelingt nach meiner Erfahrung besonders gut, wenn man (z.B.) ein Lineal vor die in Reihe aufgestellten Zylinder hält und dieses mit dem Startzeichen gleichmäßig zügig nach vorn wegzieht.

Auf breiten Schienen rollt es sich schneller

Die mit den Zylindern gemachten Erfahrungen, insbesondere die Einsicht, daß ein kleineres Trägheitsmoment zu einer schnelleren Bewegung führt, werden jedoch verunsichert, wenn man zwei gleich große (Glas-oder Stahl-)Kugeln auf etwas geneigten Gleisen (z.B. Alu-U-Profil)mit unterschiedlicher Spurweite rollen läßt. Die Erwartungen schwanken im wesentlichen zwischen der Version , beide Kugeln seien gleich schnell und der Version, die Kugel auf dem breiten Gleis sei schneller. Für die erste Version wird angeführt, die Trägheitsmomente seien aufgrund der gleichen und homogen verteilten Massen der Kugeln gleich. Dem widerspricht die zweite Version, die sich auf den unterschiedlichen Rollradius der Ku-

geln stützt. Demnach sei der Rollradius und damit das Trägheitsmoment der Kugel auf dem breiten Gleis kleiner als bei der Kugel auf dem schmalen Gleis. Sie müsse folglich schneller sein. Der Versuchsausgang zeigt dann ziemlich eindrucksvoll (vor allem dann, wenn die Rollradien möglichst stark voneinander voneinander abweichen), daß die Kugel mit dem größeren Rollradius schneller durchs Ziel geht. Mit ein wenig Hilfe kann man jedoch die sich häufig im Anschluß daran einstellende Ratlosigkeit in eine Bestätigung der letzteren Erwartung ummünzen: Die Kugel auf der

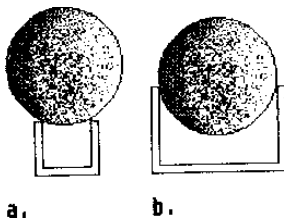


Abb.3: Querschnitt durch Kugel und U-Profil.

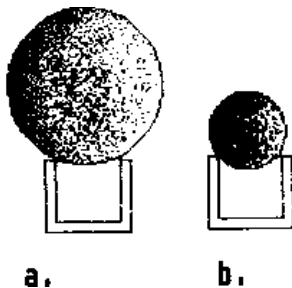


Abb.4: Große und kleine Kugel auf einem Gleis.

breiten Bahn bewegt sich (d.h. rotiert) in der Tat schneller, obwohl sie langsamer vorankommt. Gemeint ist, daß ihre Winkelgeschwindigkeit größer ist. Wegen ihres kleinen Rollradius resultiert daraus dennoch eine kleinere Translationsgeschwindigkeit als bei der Kugel mit der kleineren Winkelgeschwindigkeit aber mit dem größeren Rollradius.

Verschiedene Stöße durch unterschiedliche Größe

Noch verblüffendere Effekte erzielt man mit Stoßversuchen auf waagerechten Gleisen. Am besten beginnt man damit, daß man eine Kugel auf eine andere gleichgroße, auf dem Gleis ruhende Kugel aufprallen läßt. Zunächst wird der Versuch mit zwei großen Kugeln durchgeführt. Man beobachtet erwartungsgemäß, daß die stoßende Kugel liegenbleibt oder zumindest nur noch ein wenig nachrollt und die gestoßene Kugel wegsaust. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn man versucht, die Kugel in eine gleitende (nicht rollende) Bewegung zu versetzen.

Überrascht ist man zumeist, wenn man sieht, daß kleine Kugeln sich in einem entsprechenden Versuch ganz anders verhalten: Die Kugeln bewegen sich gemeinsam gewissermaßen aneinander klebend langsam in Richtung der stoßenden Kugel weiter.

Ähnlich überraschend ist der Unterschied im Verhalten großer und kleiner Kugeln, wenn man beide Kugeln in Bewegung versetzt und etwa in der Mitte des Gleises aufeinander aufprallen läßt. Auch in diesem Fall erfüllen die großen Kugeln im großen und ganzen die gleichem Gleis Erwartung, daß die stoßende Kugel liegenbleibt oder nur noch langsam ausrollt und stattdessen die gestoßene Kugel in Bewegung gerät. Die kleinen Kugeln zeigen indessen wieder ein davon stark abweichendes Verhalten: Nach dem Stoß streben sie ganz kurz wieder auseinander, laufen sofort danach wieder aufeinander zu, werden erneut reflektiert usw. bis sie schließlich aneinander geschmiegt liegenbleiben. Man hat den Eindruck als seien die Kugeln durch ein Gummiband miteinander verbunden.

Wie kommt es zu diesen Unterschieden? Sie kommen im wesentlichen dadurch zustande, daß das Verhalten einer großen Kugel auf einem Gleis eher durch die Translation und das Verhalten einer kleinen Kugel eher durch die Rotation bestimmt ist. Stöße zwischen nicht rollenden Kugeln führen aber zu den aus der Impulslehre bekannten Phänomenen: Stoßen - um beim letzten Versuch zu bleiben - zwei Kugeln rollend aufeinander, so behalten sie ihre Rotationsbewegung allenfalls etwas vermindert bei. Eine Reflektion kann - da sie der durch das Rollen bedingten Translationsbewegung entgegengerichtet ist - nur durch Gleiten erfolgen. Da die Gleitreibung durch die noch vorhandene Rotation verstärkt wird, kommt es i.a. zu einer sehr schnellen Dissipation der Translationsenergie. Das Rollen bewirkt sodann eine erneute Umkehr der Translationsrichtung, wodurch es zu einem abermaligen Stoß kommen und der Vorgang sich je nach der relativen Stärke der Rotation mehr oder weniger oft wiederholen kann. Große Kugeln verhalten sich grundsätzlich nicht anders als kleine. Da bei ihnen jedoch - wie wir aus der

im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Versuchsserie gelernt haben -wegen des größeren Rollradius der Translationsanteil verhältnismäßig stärker ausgeprägt ist als bei kleinen Kugeln, treten die auf der Rotation beruhenden Effekte in den Hintergrund. Zum einen gelingt es leichter, ihnen eine gleitende Bewegung zu erteilen - bei den schnell rotierenden kleinen Kugeln wird durch die größere Gleitreibung meist schließlich doch ein reines Rollen eintreten - zu anderen vermag selbst dann, wenn die Kugeln rotieren, wegen der Dominanz der Translation diese Rotation keinen wesentlichen Einfluß auf den vorwiegend translatorischen Bewegungsablauf zu nehmen. Daß der Unterschied zwischen großen und kleinen Kugeln tatsächlich nur ein gradueller ist, sieht man dann, wenn man die großen Kugeln bewußt rollend aufeinanderzulaufen läßt. Man beobachtet dann zumindest eine auffällige Verlangsamung der nach der Reflexion auseinanderlaufenden Kugeln. Die graduellen Unterschiede lassen sich sehr schön mit mittelgroßen Kugeln demonstrieren.

Interessante Variationen erhält man übrigens, wenn man statt der Stahl- oder Glaskugeln Kugeln aus anderen Materialien verwendet. Läßt man beispielsweise kleine superelastische Bälle, sog. Flummis auf dem Gleis zusammenprallen, so tritt überhaupt keine Reflexion auf. Die Bälle stoßen zusammen und bleiben liegen. Erstaunlicherweise beobachtet man dasselbe Ergebnis bei ansonsten sich total anders verhaltenden inelastischen Bällen. Natürlich verhalten sie sich aus verschiedenen Gründen gleich: Die unelastischen Bälle bleiben nach dem Stoß liegen, weil ihre Bewegungsenergie durch inelastische Verformungen dissipiert wird. Die Flummis können nach dem Stoß deshalb nicht reflektiert werden, weil sie nahezu unfähig sind zu gleiten ("no slipping condition"), was sie aber zwangsläufig tun müßten, wenn sie sich entgegen der Rotationsrichtung auseinanderbewegten. Fragt sich nur, wie sie es fertigbringen, ihre Bewegungsenergie loszuwerden.