

3. Physik auf dem Karussell der Erde

- 3.1 Trägheitskräfte
- 3.2 Coriolis- und Zentrifugalkräfte
- 3.3 Wirkungen der Trägheitskräfte auf der Erde
- 3.4 Inertialsysteme
- 3.5 Biographie: Foucault

Experimente:

- Experimente in geradlinig beschleunigten Systemen,
- Experimente auf einer sich drehenden Scheibe,
- Modellexperiment zur Abplattung der Erde
- Schießen von einem Drehstuhl aus
- Prinzip des Foucaultschen Pendel

Ohne viel nachzudenken sagen wir heute noch, dass am Morgen die Sonne „aufgeht“, obwohl wir wissen, dass Sonnenauf- und -untergang nur ein Effekt der Erddrehung sind. Unsere Sprache hat die alte Vorstellung von einer ruhenden Erde und den sich darum bewegenden Himmelskörpern bewahrt. Woher und seit wann wissen wir, dass sich die Erde um sich selbst dreht? Im Altertum suchte man nach Methoden, die Erddrehung experimentell festzustellen. Man stellte sich vor, dass Winde entstehen würden, wenn sich die Erde unter der Lufthülle wegbewegt. Oder ein Stein, den man von großer Höhe fallen ließe, würde nicht senkrecht nach unten fallen. Da keiner dieser Effekte beobachtet wurde, konnte sich die Vorstellung von einer ruhenden Erde sehr lange halten. Die Effekte, nach der man in der Antike suchte und die auch noch Kopernikus erwähnt, sind – wie wir heute wissen – entweder nicht vorhanden oder nur schwer nachweisbar: Zum Beispiel führt die Erddrehung nicht zu Winden, aber sie kann aus Winden Wirbelstürme werden lassen.

3.1 Trägheitskräfte

Kräfte sind die Ursache von Veränderungen in der Natur, z.B. Veränderungen in der Form oder der Geschwindigkeit eines Körpers. In dieser Vorlesung wollen wir uns nur mit der Änderung des Bewegungszustandes beschäftigen. Kräfte klassifiziert man nach ihrer Reichweite, ihrer Stärke usw. Wir wollen zunächst den Unterschied zwischen Nah- und Fernkräften betrachten:

Nahkräfte entstehen durch direkten Kontakt mit dem Körper, dessen Zustand verändert wird. Man denke z.B. an ein Auto oder einen Kinderwagen, den man schiebt oder den Ball, gegen den man tritt.

Bei den **Fernkräften** gibt es keinen direkten Kontakt zwischen der Quelle der Kraft und dem Körper, auf den sie wirkt. Beispiele sind die Schwerkraft, die elektromagnetischen Kräfte und die Trägheitskräfte.

Die Trägheitskräfte haben keinen dynamischen Ursprung, d.h. entstehen nicht durch Anziehung oder Abstoßung zwischen Körpern. Sie treten nur in beschleunigten Systemen auf. Hierzu ein Beispiel: Personen in einem Auto werden gegen die Rückenlehne gepresst, wenn das Auto beschleunigt wird. Bei einem Zusammenstoß, wo die Abbremsung sehr plötzlich auftritt, wirken oft sehr große Trägheitskräfte in

Bewegungsrichtung, wobei es häufig zu Verletzungen kommt. So eindeutig die Unterscheidung zwischen dynamischen und Trägheitskräften auch scheint, so haben doch die Überlegungen, die zur Allgemeinen Relativitätstheorie geführt haben, gerade bei der Frage angesetzt, ob nicht die Schwerkraft eine Trägheitskraft sei. Wir wollen es bei dieser Bemerkung belassen.

Wir wollen nun zunächst in einigen Experimenten die Effekte der Trägheitskraft in geradlinig beschleunigten Systemen betrachten.

Versuche:

Ein in einem geradlinig beschleunigten System ruhender Wagen.

In einem konstant beschleunigten System kann ein Wagen nur dann in Ruhe sein, wenn er durch eine Kraft gehalten wird.

Freier Fall auf einem konstant beschleunigten Wagen

Während in einem ruhenden oder mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig fahrenden Wagen eine Kugel beim freien Fall genau unterhalb des Punktes, an dem sie losgelassen wurde auftrifft, trifft dies in einem geradlinig beschleunigten Wagen nicht zu. Während der Wagen eine schiefe Ebene herabfährt, wird die Kugel fallengelassen und trifft deutlich hinter dem Lotfußpunkt auf.

Kräfte in einem fallenden Behälter

Zwei Massestücke sind an Gummibändern befestigt, die an der ihrer anderen Seite am Boden eines Joghurtbechers angeheftet sind. Wenn man die Gummibänder spannt, kann man die Massestücke seitlich über den Becherhand hängen lassen. Lässt man nun den Becher frei fallen, so springen die Massestücke mit lautstark ins Innere des Bechers zurück, da im beschleunigten System die Schwerkraft aufgehoben wird.

3.2 Coriolis- und Zentrifugalkräfte

In einem System, das sich mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit um eine Achse dreht, treten zwei Trägheitskräfte auf, die Coriolis- und die Zentrifugalkraft. Die Zentrifugalkraft empfindet ein Autofahrer bei jeder Kurvenfahrt. Bezeichnen wir die Winkelgeschwindigkeit mit ω , wobei $\omega = 2\pi/T$ und T die Umlaufzeit ist, dann ist die Zentrifugalkraft durch den Ausdruck:

$$F_Z = m r \omega^2$$

Gegeben. Die Kraft F_Z ist radial nach außen gerichtet, sie wächst linear mit dem Abstand r vom Drehpunkt und quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit ω .

Versuch: Auf einem Drehtisch ruhender Wagen

Auf einem Drehteller führt ein kleiner Experimentierwagen, der über einen Federkraftmesser mit einer auf der Drehachse aufgestellten Stange verbunden ist, eine Kreisbewegung aus. Die am Kraftmesser angezeigte Kraft ist die bekannte Zentripetalkraft. Für einen mitrotierenden Beobachter B^* ist der Wagen allerdings in Ruhe, so dass nach dem Newtonschen Gesetz keine Kraft auf ihn wirkt. Also folgert B^* , dass eine weitere - entgegengesetzt gerichtete, gleichgroße - Kraft auf den Körper wirken muss, die sog. Zentrifugalkraft.

Die Corioliskraft ist uns aus dem Alltag weniger vertraut. Sie wirkt in einem sich drehenden System nur auf Körper, die sich bewegen und hängt deshalb von der Geschwindigkeit v des Körpers ab:

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \cdot \omega \cdot \sin\varphi,$$

wobei φ der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und der Richtung der Drehachse ist.

Auch die Wirkung der Corioliskraft kann man in schönen Laborversuchen nachweisen.

Versuch: Rollende Kugel auf einem Drehteller

Ein in der Mitte des Drehtellers liegender Golfball wird in Richtung einer Markierung am Rande des Tellers angestoßen. Dreht sich der Teller im Gegenuhrzeigersinn, so erreicht der Ball den Rand rechts von der Markierung, bei Drehung im Uhrzeigersinn links.

3.3 Wirkungen der Trägheitskräfte auf der Erde

Die Erde dreht sich mit einer Winkelgeschwindigkeit von

$$\omega = 2 \pi / T = 2 \pi / (24 \text{ h}) = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

um die Erdachse. Wenn man die Stärke der Trägheitskräfte auf der Erde abschätzen will, bezieht man sie am besten auf die Schwerkraft $F_G = m \cdot g$, worin $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung ist. Man findet für das Verhältnis $\alpha = F_Z / F_G = 0,34\%$ für einen Punkt am Äquator, wo der Effekt der Zentrifugalkraft am stärksten ist. Die Zentrifugalkraft ist z.B. die Ursache dafür, dass die Erde keine Kugel, sondern ein abgeplattetes Rotationsellipsoid ist. Der relative Unterschied zwischen dem äquatorialen Radius a und dem polaren Radius b hat den Wert $\varepsilon = (a-b)/a = 0,336\%$. Die Gleichheit zwischen dem Wert ε der Abplattung und der relativen Stärke α der Zentrifugalkraft ist erstaunlich.

Versuch: Modellexperiment zur Erdabplattung

Ein aus 5 biegsamen Stahlbändern bestehendes Modell der Erdkugel wird in Rotation versetzt, wobei sich die Kugel in Richtung der Achse abplattet.

Will man den Einfluss der Corioliskraft relativ zur Schwerkraft auf der Erde abschätzen, muss man einen Wert für die Geschwindigkeit annehmen. Wir wählen $v = 10 \text{ m/s}$ und nehmen an, dass Drehachse und die Geschwindigkeit senkrecht aufeinander stehen. Dann ergibt sich $F_C / F_G = 0.015 \%$, ein recht kleiner Wert. Dennoch spielt er bei manchen Bewegungen, bei denen es auf Präzision ankommt, eine wichtige Rolle. Bei der Artillerie, die über Distanzen von einigen 10 Kilometern mit Geschwindigkeiten von etlichen 100 m/s schießt, können die Einschläge um 100 m oder mehr seitlich vom Zielpunkt abweichen.

Versuch: Schießen auf dem Drehstuhl

Auf einem drehbaren Stuhl sitzt eine Person, die zunächst in Ruhe aus einer Pistole auf eine mit dem Stuhl verbundene Zielscheibe schießt. Wird dann der Stuhl mit der Zielscheibe gedreht, so schlägt bei gleicher Zielrichtung der zweite Bolzen seitlich neben dem erstent ein. Der mitrotierende Beobachter macht für diese Abweichung eine Kraft, die sog. Corioliskraft, verantwortlich.

Ein besonders eindrucksvoller Effekt der Corioliskraft ist die Drehung der Ebene, in der ein reibungsfrei aufgehängtes Pendel schwingt. Hängt man ein Fadenpendel mit möglichst großer Länge über einer Scheibe mit einer Winkeleinteilung auf und lässt es

schwingen, so dreht sich die Richtung der Pendelebene langsam. Am Nordpol dauert eine volle Drehung gerade 24 Stunden, während am Äquator überhaupt keine Drehung zu beobachten ist. An einem Ort mit der geographischen Breite φ beträgt die Zeit für einen vollen Umlauf $24 \text{ h}/\sin\varphi$. Der eigentliche Grund für diese Drehung liegt nicht darin, dass auf das Pendel eine Kraft ausgeübt wird, sondern darin, dass sich die Erde unter dem Pendel wegdreht. Denn für einen außerirdischen Beobachter verändert sich die Richtung der Pendelebene nicht. Das Foucaultsche Pendel ist der schönste Nachweis für die Drehung der Erde.

Versuch: Modell eines Foucaultpendels

Ein Fadenpendel wird auf einen Drehteller gestellt und in Schwingungen versetzt. Projiziert man die Apparatur an die Wand, so erkennt man, dass die Schwingungsebene des Pendels sich nicht verändert, auch wenn der Teller langsam gedreht wird. Für einen mitrotierenden Beobachter dreht sich die Schwingungsebene entgegengesetzt zur Rotationsrichtung.

Ein weiterer wichtiger Effekt der Corioliskraft tritt bei der Luftbewegung auf der Erdoberfläche auf. Hier muss man die Wirkung der Corioliskraft mit den Kräften, die zu den Winden führen, nämlich Druckgradienten und Reibungskräften vergleichen. Wir schätzen hier nur das Verhältnis $\beta = F_C/F_D \approx 2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot v / (\delta p/L)$, ab, worin ρ die Dichte der Luft, v ihre Geschwindigkeit und δp die Luftdruckdifferenz zwischen zwei Orten im Abstand L ist. Für die Abschätzung benutzen wir die folgenden Werte: $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$, $v = 10 \text{ km/h}$, $\delta p = p_0/100$, worin $p_0 = 10^5 \text{ N/m}^2$ der Normaldruck ist, und als charakteristische Länge $L = 10 \text{ km} = 10^4 \text{ m}$. Hierfür erhalten wir $\beta = 0,6\%$. Dieser Wert gilt für die bei uns üblichen Winde und ist nicht besorgniserregend. Jedoch wenn über Distanzen von $L = 500 \text{ km}$ und mit Windgeschwindigkeiten von 50 km gerechnet wird, erhöht sich das Verhältnis auf $1,6 = 160\%$. Damit wird die Corioliskraft die dominante Kraft und man versteht, dass sie die Ursache für die Wirbelstürme in manchen Regionen unserer Erde sein kann. Auf der oberen Halbkugel führt sie zu einer Rechtsabweichung des Windes, auf der unteren Halbkugel zu einer Linksabweichung.

3.4 Inertialsysteme

Die Trägheitskräfte entstehen dadurch, dass man die Physik im „falschen System“ beschreibt. Wenn man z.B. die Bewegung des Foucaultschen Pendels auf der Erde nicht in einem System beschreibt, das mit der Erde rotiert, sondern z.B. im Zentrum des Sonnensystems feststeht, dann verschwinden alle Trägheitskräfte. Bei der Beschreibung des Foucaultschen Pendels träte nur die rücktreibende Kraft auf. Das Pendel würde nur hin und her schwingen und sich nicht im Raum drehen.

Ein „richtiges System“ in dem alle Trägheitskräfte verschwinden, nennt man ein Inertialsystem. Hat man ein Inertialsystem gefunden, dann sind nach dem Galileischen Relativitätsprinzip alle Systeme, die sich relativ zu diesem geradlinig gleichförmig bewegen, auch Inertialsysteme. Aber wie findet man das erste Inertialsystem? In den meisten Physikbüchern wird ein System, das relativ zu den Fixsternen ruht, als Inertialsystem angegeben. Dies ist jedoch nur näherungsweise richtig, da auch die uns benachbarten Fixsterne sich einmal in etwa $250 \cdot 10^6$ Jahren um das Zentrum der Milchstraße drehen. Heute ist man in der Lage, ein kosmisches Inertialsystem anzugeben, nämlich das System, in dem die Mikrowellenstrahlung isotrop ist, d.h. keine Rot- oder Blauverschiebung zeigt.

3.5 Biographie: Jean Bernard Léon Foucault (1819 - 1868)

Schlägt man in einem Lexikon unter dem Namen Leon Foucault nach, so findet man, dass er ein französischer Physiker war, der um die Mitte des 19. Jahrhunderts einige Aufsehen erregende Experimente durchführte: So wies er mit einem Pendelversuch nach, dass die Erde sich um ihre eigene Achse dreht, und zeigte, dass sich Licht in Wasser langsamer ausbreitet als im Vakuum. Auf Grund solch bahnbrechender Erfolge sollte man annehmen, dass Foucault ein studierter Naturwissenschaftler war. Doch dem ist nicht so, sein Lebensweg verlief nicht auf einer geradlinigen Bahn.

Sein Vater war ein wohlhabender Verleger und Buchhändler, der wegen seiner gebrechlichen Gesundheit schon früh in den Ruhestand ging. Er starb, als sein Sohn erst 9 Jahre alt war. Auch von dem Jungen wird berichtet, dass er eine angegriffene



Gesundheit hatte, dass er als Kind unbeholfen war und sich meist zurückzog. Seine Mutter schickte ihn in das Collège Stanislas, doch dort zeigte sich bald, dass er faul war und seine Arbeiten nicht pünktlich abgab. So musste er die Schule wieder verlassen und wurde von Privatlehrern erzogen. Lissajous, einer von seinen wenigen Freunden aus Kindheitstagen, schreibt dazu: "*Seine gebrechliche Konstitution und seine langsame Arbeitsweise machten es ihm unmöglich, an einem Collège zu studieren.*" Was Foucault vom Collège Stanislas blieb, war die Freundschaft zu einem Mitschüler, Hippolyte Fizeau.

Im Laufe der Jahre merkte man, dass akademische Arbeit wohl nichts für den Jungen sein würde, doch bereits als Teenager zeigte er andere Talente. Er baute gern Spielzeuge und kleine Maschinen. Seine Mutter glaubte, dass er auf Grund seiner manuellen Geschicklichkeit ein guter Chirurg werden könnte. So schrieb sich Foucault 1839 an der medizinischen Hochschule von Paris ein, machte dort zunächst gute Fortschritte und sein Professor Alfred Donné war mit ihm sehr zufrieden. Doch bald schon wurde ihm klar, dass er für den Arztberuf nicht geeignet war. Es wird berichtet, dass er beim Sezieren großen Ekel empfand und dass er bei seinem ersten Krankenhauseinsatz in Ohnmacht fiel, als er Blut sah. Da Donné weiterhin Foucaults Talente für die Wissenschaft nutzen wollte, ohne dass der mit Patienten in Kontakt käme, machte er ihn zu seinem Assistenten.

Bald darauf besuchten Foucault und Fizeau einen Vortrag von Daguerre, in dem dieser über fotografische Methoden berichtete. Die beiden waren begeistert und versuchten sofort, den fotografischen Prozess zu verbessern. Schon bald fertigte Foucault Fotografien durch ein Mikroskop an und 1845 veröffentlichte er zusammen mit Donné ein Buch mit dem Titel "Ein Kurs zur Mikroskopie", in dem 80 Fotografien von Objekten unter einem Mikroskop zu sehen sind.

Donné gab auch die täglich erscheinende Zeitschrift "Journal des Débats" heraus, in der mathematische und naturwissenschaftliche Probleme und Ergebnisse in allgemeinverständlicher Form dargestellt wurden. Diese Aufgabe übertrug er 1845 an Foucault, der sie mit beachtlichem Erfolg ausführte, so dass der französische Mathematiker Bertrand

zufolgendem Urteil kam [2]: *"At the age of 25, not having learnt anything at school nor from book, enthusiastic about science but not about study, Léon Foucault took on the task of making the work of scientists understandable to the public and of passing judgement on the value to the work of leading men of science. From the start he showed great subtlety, good judgement based on more prudence than would be expected. His first articles were remarkable; they were spiritual. He took his duties seriously. Launched, without any experience, into the highest level of science with all its confusion and problems, he was assured carrying out a role in which mediocrity would mean failure, with complete success.*

... Always polite, yet seeking the truth, Foucault applied carefully considered judgements. Previously an unknown, this young man with no scientific publications nor known scientific discoveries, displayed a quiet authority and frankness which irritated many leading scientists."

Durch die Veröffentlichung seines Buches wurde der Physiker und Astronom Arago (1786 - 1853) auf Foucault aufmerksam und fragte ihn und Fizeau, den er persönlich kannte, ob sie nicht versuchen wollten, Fotografien von der Sonne anzufertigen. Sie hatten Erfolg und erhielten die ersten Sonnenfotos, auf denen eine Anzahl von Sonnenflecken zu sehen war. Arago erkannte sofort Foucaults Potential, so dass er beschloss, ihn weitere Experimente für die Académie des Sciences ausführen zu lassen. Als nächstes sollten nun Foucault und Fizeau die Lichtgeschwindigkeit messen, sowohl in Luft als auch in Wasser. Eigentlich wollte Arago diese Messungen selbst ausführen, doch auf Grund seiner nachlassenden Sehkraft traute er sich die dazu notwendigen genauen Beobachtungen nicht mehr zu. Die beiden begannen nach der von Arago vorgeschlagenen Methode, hatten aber bald darauf Streit, so dass sie getrennte Wege gingen und jeder sein eigenes Experiment ausführte. So kam es, dass in etwa zur gleichen Zeit und am gleichen Ort zwei verschiedene Messungen der Lichtgeschwindigkeit durchgeführt wurden, die für die damalige Zeit erstaunlich gute Ergebnisse lieferten. Der Wert für die Lichtgeschwindigkeit in Luft lag bei Fizeau um 5% über, der von Foucault um weniger als 1% unter dem heutigen Wert; beide fanden heraus, dass sich Licht in Wasser langsamer bewegt als in Luft, was die Wellentheorie des Lichts bestätigte. Foucault hat für seine Messungen einen Drehspiegel eingesetzt, der durch eine Dampfmaschine angetrieben wurde und mit bis zu 800 Umdrehungen pro Sekunde rotierte. Über diesen wurde das Licht auf einen ca. 20 m entfernten Umlenkspiegel geschickt und dort reflektiert. In der Zeit, in der das Licht die 40 m lange Strecke durchläuft, hat sich der Drehsiegel ein wenig weiter gedreht, so dass auf einem Schirm eine Verschiebung des Lichtflecks 6 bis 7 mm zu beobachten ist.

Bei seinen astronomischen Aufnahmen hatte Foucault erkannt, dass in den meisten Fällen eine Nachführung des Fotoapparates notwendig ist. Hierzu verwendete er u.a. eine Pendeluhr, wobei er bemerkte, dass die Schwingungsebene des Pendels im Raum fixiert ist. Damit hatte er eine Möglichkeit gefunden, die Drehung der Erde um ihre eigene Achse zu demonstrieren. Zunächst führte er das Experiment im eigenen Hause aus. Als er Arago davon erzählte, bat der ihn, den Versuch im Pariser Observatorium zu wiederholen. Die Vorführung, zu der alle in Paris lebenden Wissenschaftler eingeladen wurden, fand am 3.2.1851 statt und war ein voller Erfolg. Im darauffolgenden Jahr wurde der Versuch vor einer großen Menschenmenge im Pantheon wiederholt: Eine schwere Eisenkugel, an deren Unterseite ein Nagel angebracht war, hing an einem mehr als 60 m langen Eisendraht. Bei der Schwingung zog der Nagel eine Linie in den

Sandboden, die sich im Laufe der Zeit drehte. Damit war 300 Jahre nach Kopernikus ein experimenteller Nachweis für die Drehung der Erde erbracht.

Um noch auf andere Weise die Erddrehung zu demonstrieren, erfand Foucault das Gyroskop, das er zur Nachführung von Teleskopen und zur Regelung großer Dampfmaschinen benutzte. Auch wenn es in der damaligen Zeit insgesamt nicht von großer Bedeutung war, so wird es heute in Flugzeugen und satellitengestützten Teleskopen eingesetzt, z.B. auch im Hubble Space Telescope.

Foucault, der nun zwar bekannt und berühmt war, der aber außer der Herausgabe des "Journal des Débats" keinen Beruf und damit auch kein Einkommen hatte, wurde schließlich durch die politischen Ereignisse in Frankreich begünstigt: Im Dezember 1851 kam es zu einem Staatsstreich; der Präsident Louis Napoleon Bonaparte ließ führende Oppositionspolitiker verhaften und löste die Nationalversammlung auf. Kurze Zeit später ließ er sich den Staatsstreich durch ein Referendum billigen und nach einem Jahr zum Kaiser Napoleon III. krönen. Er selbst war ein Hobbywissenschaftler, der die Wissenschaft allgemein und Foucault im besonderen unterstützte. So wurde eine neue Stelle am Pariser Observatorium, das nun in Kaiserliches Observatorium umbenannt wurde, geschaffen: Foucault wurde dem Observatorium als Physiker zugeordnet. In der Folgezeit entwickelte er hervorragende Teleskope mit vielen innovativen Eigenschaften. So benutzte er als erster versilbertes Glas bei der Konstruktion von Spiegelteleskopen, mit denen zum erstenmal Sternspektren aufgenommen wurden. Zwar hatte bereits Newton das Spiegelteleskop erfunden, doch die von ihm benutzten Metallspiegel liefern sehr schnell an.

Foucault arbeitet außerdem auf dem Gebiet der Wärmelehre sowie der Elektrizitätslehre und des Magnetismus; hierbei entdeckte er die Wirbelströme in Metallen.

Obwohl er nicht zur eigentlichen Wissenschaftlergemeinschaft gehörte, erhielt Foucault zahlreiche Ehrungen: Er wurde von Napoleon III. zum Offizier der Ehrenlegion ernannt, war Fellow der Royal Society und Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina. Im Jahre 1865 wurde er sogar Mitglied der Französischen Akademie der Wissenschaft, wo er für Clapeyron nachrückte. Doch bald darauf erkrankte er an Aphasie, war nahezu blind und stumm, als er 1868 im Alter von nur 48 Jahren starb.

Quellen:

1. <http://ams.astro.univie.ac.at/~nendwich/Science/SoFi/portrait.html>
2. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Foucault.html>
3. <http://www.madehow.com/inventorbios/39/Jean-Bernard-L-on-Foucault.html>