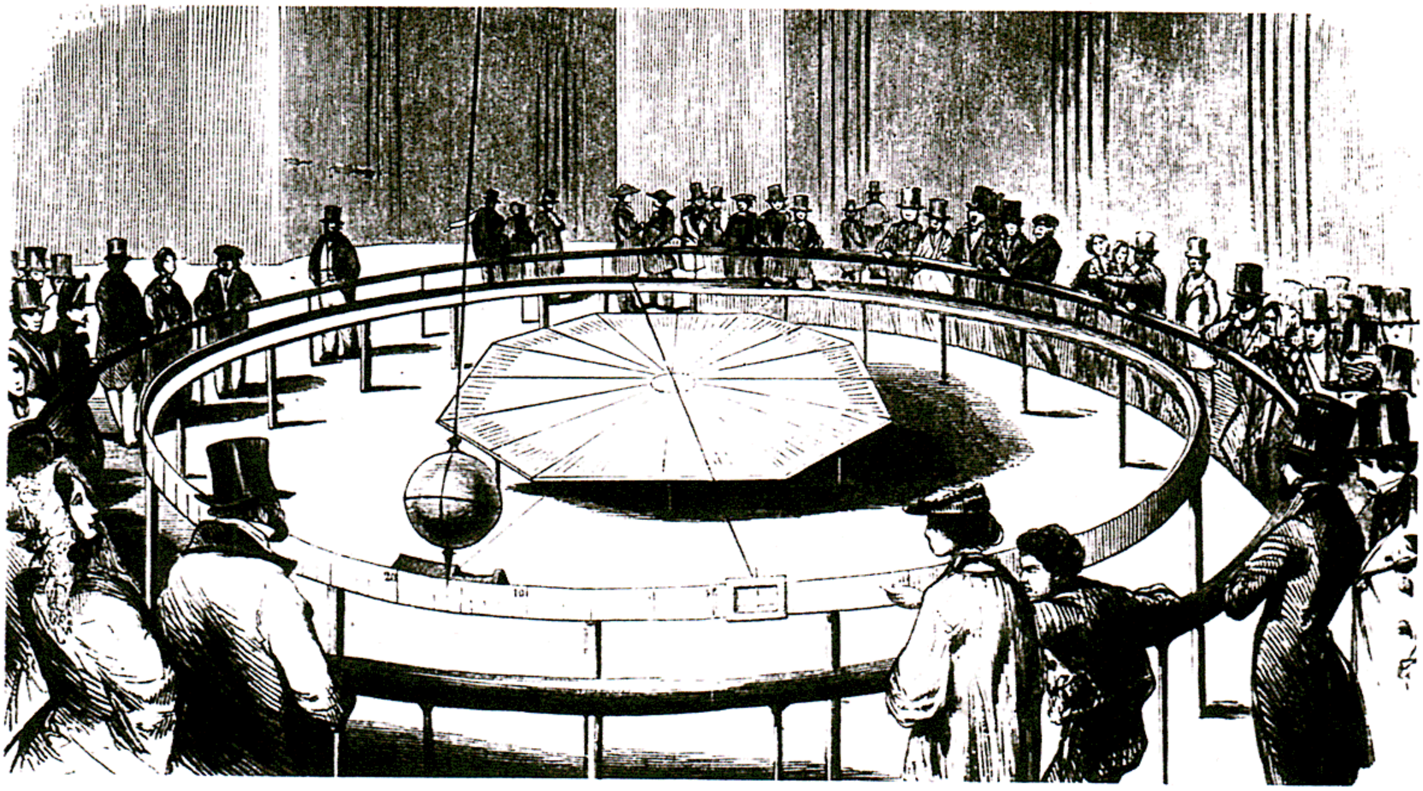

Peter Stettler

Dreht sich die Erde ?

Peter Stettler

Dreht sich die Erde?

Eine exemplarische Einführung in das physikalische Denken[1]

Dreht sich die Erde? 1
1. Einleitung 2
2. Die Phänomene 3
2.1. Sonnentaler 3
2.2.Der Tages- und der Jahreslauf der Sonne 5
2.3. Die Kugelgestalten des Mondes und der Erde 6
2.4. Finsternisse 9
2.5. Aristarchs Blick auf den Halbmond 11
2.6. Die Bewegungen des Sternenhimmels 13
3. Erste Erklärungen von Phänomenen 17
3.1. Die Rhythmen des Mondes 17
3.2. Die Entfernung des Mondes 18
3.3. Die Geschwindigkeit des Mondes 20
3.4. Geo-Metrie nach Eratosthenes 21
3.5. Wie sieht das Licht aus? 22
4. Das heliozentrische Weltbild 23
5. Gegenargumente 24
5.1. Ein Argument, das gegen die Drehung der Erde spricht 24
5.2. Ein Argument, das gegen das heliozentrische System spricht 25
6. Die Ostabweichung 25
6.1. ISAAC NEWTON macht einen interessanten Vorschlag 25
6.2. GUGLIELMINIS Fallversuche 26
6.3. Übereinstimmung von Experiment und Theorie 28
6.4. Effekte können verschiedene Ursachen haben 31
(Exkurs in die Wärmelehre) 31
7. Das Foucaultsche Pendel 33
7.1. Die Bewegung eines Pendels 33
7.2. Die Experimente von FOUCAULT 34
7.3. Die Theorie des Foucaultschen Pendels 37
8. Trägheitskräfte 40
8.1. Die Zentrifugalkraft 40
8.2. Die Abplattung der Erde 48
8.3. Die Corioliskraft 49
8.4. Woran erkennt man Trägheitskräfte? 49
9. Ausblick ins Weltall 51
9.1. Die Fixstern-Parallaxe 51
9.2. Fixsterne und Weltall 53

[1] MARTIN WAGENSCHEIN: *Die Erfahrung des Erdballs, Beitrag zu einer genetischen Didaktik der Himmelskunde,* in: M.W.: *Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken,* Bd. II, , Klett-Verlag, Stuttgart 1970.

1. Einleitung

Der italienische Schriftsteller UMBERTO ECO lässt seinen Roman „Das Foucaultsche Pendel“ in der Kirche Saint-Martin-des Champs, die zum *Conservatoire des Art et Métiers* in Paris gehört, wie folgt beginnen[2]:

> Da endlich sah ich das Pendel.
>
> Die Kugel, frei schwebend am Ende eines langen metallischen Fadens, der hoch in der Wölbung des Chores befestigt war, beschrieb ihre weiten konstanten Schwingungen mit majestätischer Isochronie. …
>
> Die kupferne Kugel emanierte schwach schimmernde Reflexe im Schein der letzten Sonnenstrahlen, die durch die Kirchenfenster eindrangen. Hätte sie, wie einst, mit ihrer Spitze eine Schicht feuchten Sandes auf den Boden des Chores gestreift, so hätte sie bei jeder Schwingung eine dünne Furche in den Boden gegraben, und die Furche hätte jedesmal um ein winziges Stück ihre Richtung ändernd, sich immer mehr in Form einer Bresche, eines Tales erweitert, um eine strahlenförmige Symmetrie erraten zu lassen. … In diesem Augenblick dämpfte das Pendel seine Geschwindigkeit am äussersten Ende des Schwingungsbogens, bis es zum Stillstand kam, um gleichmütig wieder ins Zentrum zurückzufallen, bis zur Mitte der Bahn an Geschwindigkeit zu gewinnen und zuversichtlich in das okkulte Quadrat der Kräfte zu säbeln, das sein Schicksal bestimmte.
>
> Ein Dialog schreckte mich auf, ein sachliches und teilnahmsloses Gespräch zwischen einem Jüngling mit Brille und einem Mädchen, das leider keine trug.
>
> „Das Foucaultsche Pendel“, sagte er. „Erstes Experiment im Labor 1851, dann im Observatoire und dann unter der Kuppel des Panthéon, mit einem siebenundsechzig Meter langen Faden und einer Kugel von achtundzwanzig Kilo. Schliesslich 1855 hier aufgebaut, etwas kleiner, und seitdem hängt es nun da aus dem Loch auf halber Höhe des Kreuzgewölbes.“
>
> „Und was macht es da? Pendelt bloss so?“
>
> „Es demonstriert die Rotation der Erde. Weil der Aufhängepunkt, der bleibt stehen...“
>
> „Und wieso bleibt er stehen?“
>
> „Weil ein Punkt... wie soll ich sagen... in seinem Mittelpunkt... also pass auf, jeder Punkt, der genau in der Mitte der Punkte ist, die du siehst, ich meine, diesen zentralen Punkt - den geometrischen Punkt -, den kannst du nicht sehen er hat keine Dimensionen, und was keine Dimensionen hat, kann weder rechtsrum noch linksrum gehen, weder rauf noch runter. Deswegen rotiert er nicht. Verstehst du? Wenn der Punkt keine Dimensionen hat, kann er sich auch nicht um sich selbst drehen. Er hat nicht mal ein Selbst...“
>
> „Auch nicht, wenn die Erde sich dreht?“

---

2 UMBERTO ECO: *Das Foucaultsche Pendel,* Hanser Verlag, München 1989

> „Die Erde dreht sich, aber der Punkt dreht sich nicht. Ob's dir passt oder nicht so ist das nun mal. Okay?“
>
> „Seine Sache“.

A 1 Textinterpretation
Bist Du mit den Erklärungen des „Jünglings mit Brille“ zufrieden? Wenn nicht: Such die Schwachpunkte seiner Argumentation.

Das Foucaultsche Pendel soll also die Rotation der Erde demonstrieren. Aber JEAN BERNARD LÉON FOUCAULT (1819 – 1868) wäre nie auf die Idee gekommen, die Drehung der Erde zu beweisen, wenn er nicht schon vorher davon überzeugt gewesen wäre. Wie war er, und wie waren NEWTON, KEPLER, GALILEI und KOPERNIKUS denn auf diese Idee gekommen, die doch eigentlich absurd ist? Sie alle hatte sie letztlich von ARISTARCH VON SAMOS, der um 280 v. Chr. lebte. Aber wie kam ARISTARCH darauf?

Wie konnte man damals ohne technische Hilfsmittel auf diese unwahrscheinliche Idee kommen, dass sich die Erde dreht? Muss nicht die primäre Wirklichkeit irgendwie zu ARISTARCH „gesprochen“ haben? Und sollten die Phänomene nicht auch zu uns „sprechen“ und uns zu eigenen Gedanken über die Drehung der Erde anregen?

2. Die Phänomene

Phänomene sind Naturerscheinungen, die sich uns unmittelbar zeigen. Wir können einem Phänomen wie einem Gegenüber begegnen und es auf uns wirken lassen. Erst wenn wir eine Sache ruhig und genau betrachtet oder beobachtet haben, sollten wir mit den theoretischen Reflexionen beginnen. Erst sollten wir genau wissen, was wir erklären wollen. Nur so können begründete naturwissenschaftliche Erkenntnisse entstehen.

Die Bewegung der Erde ist kein Phänomen, denn wir spüren weder etwas von ihrer täglichen Umwälzung noch von ihrer jährlichen Umrundung der Sonne. Wir können nicht einmal ihre Kugelgestalt sehen. Also müssen wir nach Phänomenen suchen, aus denen man indirekt auf die Gestalt und die Drehung der Erde sowie ihre Wanderung um die Sonne schliessen kann.

2.1. Sonnentaler

Oft sieht man im Schatten von Bäumen oder Sträuchern auffällig viele ovale Flecken, die gruppenweise etwa gleich gross sind. JOHANNES KEPLER beschreibt diese *Sonnentaler* wie folgt[3]:

> „Dass der Sonnenstrahl, der durch irgendeine Spalte dringt, in Form eines Kreises auf die gegenüberliegende Fläche auffällt, ist eine allen geläufige Tatsache. Dies erblickt man unter rissigen Dächern, in Kirchen mit durchlöcherten Fensterscheiben und ebenso unter jedem Baume. Von der

[3] JOHANNES KEPLER: *Grundlagen der geometrischen Optik* (im Anschluss an die Optik des Witelo), Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 198, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1922.

wunderbaren Erscheinung dieser Sache angezogen, haben sich die Alten um die Erforschung der Ursachen Mühe gegeben. Aber ich habe bis heute keinen gefunden, der die richtige Erklärung gefunden hätte."

A 2 Gruppenarbeit / Heimversuch zum Thema «Sonnentaler»

- Such einen Sonnentaler. Leg ein Blatt Papier darauf. Halte das Papier dann so ins Sonnenlicht, dass der Taler kreisförmig ist.
  Welche Lage hat dann das Papier bezüglich der Sonnenstrahlen?
- Nach Keplers Theorie entsteht ein Sonnentaler, wenn sich das Licht durch eine enge Öffnung zwängt. Such diese kleine Öffnung, indem Du das Papier dem Sonnenstrahl entlang bis zur kleinen Öffnung hin bewegst. Beobachte den hellen Fleck auf dem Papier auf dem ganzen Weg vom Boden zum Loch hinsichtlich Grösse, Form und Helligkeit.
- Leg das Papier wieder auf einen Sonnentaler auf dem Boden. Zeichne den Umriss des Sonnentalers auf das Papier.
- Die Sonnentaler bewegen sich. Miss die Zeit, die ein Sonnentaler benötigt, um seinen eigenen Durchmesser zu durchlaufen.

A 3 Überlegung

Überprüf die beiden folgenden Aussagesätze:

- „Die Sonnentaler bewegen sich auf dem Boden."
- „Der Boden bewegt sich unter den Sonnentalern."

Man kann für beide Ansichten Argumente finden. Begründe daher Deine Antwort in einem kurzen Text.

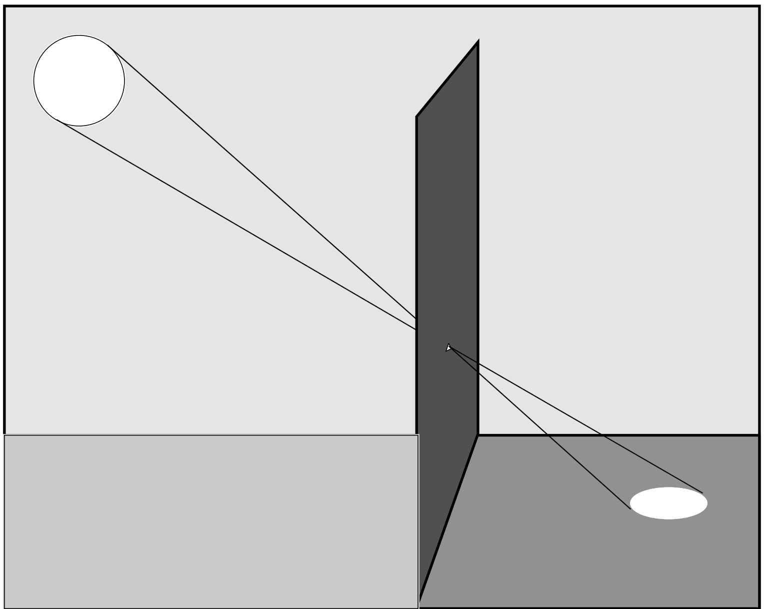

Abb. 1: Sonnentaler (schematisch)

Die Sonnentaler sind die «Camera-Obscura»-Bilder der Sonnenscheibe. Dies bestätigt sich besonders eindrücklich bei wechselnder Bewölkung, wenn die Wolken die Sonnentaler in „verkehrter" Richtung überdecken.

A 4 Winkeldurchmesser der Sonnenscheibe (Partneraufgabe)

a) Halte ein möglichst kleines Geldstück vor die Augen Deines Partners, bis es ihm gleich gross erscheint, wie die Sonne am Himmel. Schätz die Entfernung zwischen seinem Auge und dem Geldstück ab und merk Dir diese Distanz.

b) Aus der Zeit, die ein Sonnentaler braucht, um seinen Durchmesser zu durcheilen, kannst Du nachrechnen, dass die Sonnenscheibe von uns aus gesehen einen Winkeldurchmesser von einem halben Grad hat.

c) Miss nun den Durchmesser des Geldstücks. Berechne die Entfernung, aus welcher auch dieses unter einem Winkeldurchmesser von 0.5° erscheint.

d) Halte das Geldstück nun in der berechneten Entfernung vor die Augen Deines Partners. Ja, so klein erscheint uns die Sonnenscheibe!

2.2.Der Tages- und der Jahreslauf der Sonne

Die Zeitmessung an einem Sonnentaler hat ergeben, dass die Sonne auf ihrem Weg über den Himmel jeweils zwei Minuten braucht, um ihren eigenen Durchmesser zu durcheilen. Das ist auch die Dauer eines Sonnenaufgangs oder eines Sonnenuntergangs in den Gegenden um den Äquator, denn dort geht die Sonne mehr oder weniger senkrecht auf bzw. unter.

An einem Ort mit einer geografischen Breite von 47° geht die Sonne bei Tag-Und-Nacht-Gleiche genau im Osten in einem Winkel von 43° bezüglich eines flachen Horizontes auf. 6 Stunden später erreicht sie im Süden ihre maximale Höhe und steht dann 43° über dem Horizont. Wieder 6 Stunden später geht sie unter demselben Winkel im Westen unter. Würde man die Spur der Sonnentaler einen ganzen Tag lang verfolgen, so wäre diese gerade.

Um das zu verstehen, stellen wir uns den Lauf der Sonne bei Tagundnachtgleiche am Nordpol vor. Die Sonne läuft dort von links nach rechts dem Horizont entlang. In 24 Stunden umkreist sie den Beobachter. Die Peripherie dieses Kreises erscheint ihm gerade, denn er befinden sich im Mittelpunkt des Kreises. Aus dem gleichen Grund erscheint uns jeder flache Horizont gerade.

Die Tagundnachtgleiche-Bahn der Sonne ist aber nicht nur auf dem Nordpol gerade, sondern überall. Wer sich auf einer geographischen Breite von 47° befindet, sieht die Sonnenbahn um 43° geneigt[4]. Bei Tagundnachtgleiche befinden sich die Schnittpunkte der Sonnenbahn mit dem Horizont genau im Osten und im Westen. Und am Mittag erreicht die Sonne eine maximale Höhe von 43° im Süden.

Im Frühling schraubt sich die Sonne täglich höher bis zur Sommer-Sonnenwende am 22. Juni. Dann läuft die Sonne auf einer Bahn, die um 23.5° höher steht als am 21. März. Stellen wir uns den Sommerlauf der Sonne wieder auf dem Nordpol vor: Die Sommersonne kreist dort auf einer konstanten Höhe von 23.5° um den Beobachter. Diese Bahn erscheint ihm aber nicht mehr gerade, sondern als ein riesiger Kreis, dessen Zentrum im Zenit liegt.

In einer geografischen Breite von 47° geht die Sonne bei der Sommer-Sonnenwende etwa 2 Stunden früher als beim Frühlingsanfang. Und sie geht 35° nördlich von Osten auf. Am Mittag erreicht sie eine Höhe von 66.5°. Am Abend geht sie geht 2 Stunden später unter als am 21. März und wieder 35° nördlich von Westen. Ein Stroboskop-Bild eines Sonnenaufgangs im Sommer sieht etwa wie folgt aus:

[4] $43° = 90° - 47°$

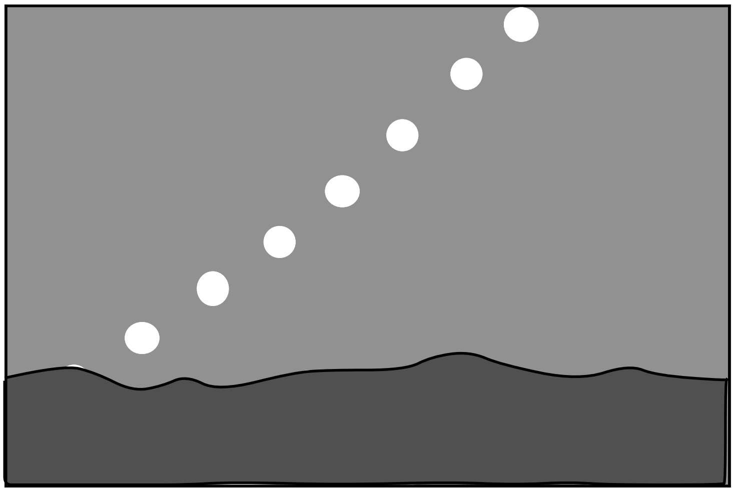

Abb. 2: Sonnenaufgang im Sommer

A 5 Wintersonne

a) Zeichne nach obigem Muster einen Sonnenaufgang im Winter.

b) Um wieviel Uhr Ortszeit und in welcher Himmelsrichtung geht die Wintersonne auf?

c) Aus welchem Winkel über dem Horizont strahlt die Wintersonne am Mittag?

d) Begründe, warum die Sonne sowohl im Sommer wie auch im Winter flacher aufgeht als im Frühling und im Herbst.

e) Stimmt die Behauptung „d“ auch mit der Erfahrung überein? Stimmt es, dass die Dämmerung sowohl im Sommer wie auch im Winter jeweils länger dauert als im Frühling oder im Herbst? Überleg Dir diese Frage auch an einem extremen Beispiel: etwa bezüglich eines Ortes nahe beim nördlichen Polarkreis.

d) Erkläre das Zustandekommen der Jahreszeiten aus dem *erlebbaren* Tages- und Jahreslauf der Sonne[5].

2.3. Die Kugelgestalten des Mondes und der Erde

Die Frage, ob die Erde sich dreht, setzt voraus, dass man weiss, dass die Erde eine Kugel ist, die frei im Weltall schwebt. Das wussten auch schon die Griechen, die ja Gefangene des Mittelmeerraumes waren. Dass wegfahrende Schiffe von dem Berg des „abwärts“ gekrümmten Meeresspiegels unter dem Horizont verschwinden, hat man immer schon gesehen. Wölbung ist gewiss da, aber das macht noch lange keine Kugel.

Die Form eines Gegenstandes lässt sich nur ermitteln, wenn man diesen Gegenstand aus einer bestimmten Entfernung betrachtet. Darum betrachten wir zunächst den Mond mit der Frage, inwiefern er sich uns als Kugel zeigt.

[5] „Die Jahreszeiten kommen zustande, weil die Erdachse schief ist“ gilt also nicht als Erklärung!

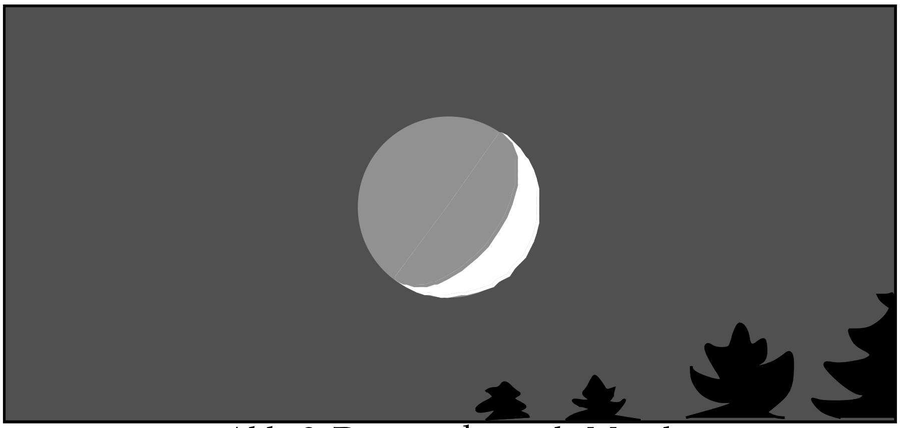

Abb. 3: Der zunehmende Mond

Wer unter „gebildeten“ Menschen eine Umfrage macht, warum man meistens nur einen Teil des Mondes sieht, ist erstaunt zu erfahren, dass eine grosse Mehrheit den Erdschatten für das Zustandekommen der Mondphasen verantwortlich macht. Viele Menschen wissen nicht einmal, dass man den Mond oft auch am Tag sieht und dass er, ähnlich wie die Sonne, über den Himmel wandert, nur etwas langsamer.

Über den Mond und sein Lichtverhältnis zur Sonne, aber auch zur Erde, hat der italienische Universalgelehrte und Maler LEONARDO DA VINCI einen schönen, fast poetischen Text verfasst[6]:

La luna non ha lume da sè se non quanto ne vede il sole, tanto l'allumina; della qual luminosità, tanto ne vediamo quanto è quella che vede noi.	Der Mond hat kein Licht von sich aus, und soviel die Sonne von ihm sieht, soviel beleuchtet sie; und von dieser Beleuchtung sehen wir soviel, wieviel davon uns sieht.
E la sua notte riceve tanto di splendore, quanto è quello che li prestano le nostre acque nel refretterli il simulacro del sole, che in tutte quelle che vedano il sole e la luna si specchia.	Und seine Nacht empfängt so viel Helligkeit, wie unsere Gewässer ihm spenden, indem sie das Bild der Sonne spiegeln, die sich in allen jenen spiegelt, welche die Sonne und den Mond sehen

Die Abb. 3 ist ein naives Bild der Mondsichel über dem Horizont. Aber dieses einfache und vertraute Phänomen kann uns viel über die Gestalt und die Bewegung des Mondes sagen, wenn wir es astronomisch interpretieren:

1) Die Sonne beleuchtet stets die Hälfte des Mondes. Und von dieser beleuchteten Hälfte sehen wir meistens nur einen Teil. Der innere Rand der Mondsichel ist die „Tag-Nacht“-Grenze auf dem Mond. Dort kann man mit einem Feldstecher die Sonnen- und Schattenseiten der Berge und Krater auf dem Mond besonders deutlich sehen.

---

[6] LEONARDO DA VINCI: *Philosophische Taschenbücher*, Rowohlts Klassiker, Bd. 25, S. 69.

Wenn die „Hörnchen“ der Sichel gegen links oben zeigen, steht die Sonne rechts unten. In unserem Beispiel ist also bereits untergegangen.

2) An der kleinen Mondsichel kann man auch direkt sehen, dass die Sonne weiter von uns entfernt ist, als der Mond: Die Sonne leuchtet diesen von hinten an. Der Sichelmond erscheint uns stets im Gegenlicht.
3) Wenn die Mondsichel etwa $^1/_6$ so breit ist wie die Scheibe des Vollmondes ist der Mond etwa 4 Tage alt (d.h. wir sehen ihn 4 Tage nach Neumond). Oder anders ausgedrückt: Der Mond hat auf seinem Gang über den Himmel eine Verspätung von rund 3 Stunden gegenüber der Sonne. Die Abb. 3 zeigt die Mondsichel kurz vor dem Untergang des Mondes, also rund 3 Stunden nach Sonnenuntergang.
4) Sonne und Mond laufen von links nach rechts über den Himmel. Der abgebildete Mond ist zunehmend. Die Distanz zwischen den beiden Himmelskörpern vergrössert sich, und die Verspätung des Mondes wird täglich grösser. So können wir der Mondsichel auch ansehen, dass der Mond langsamer über den Himmel läuft, als die Sonne.
5) Wenn es genügend dunkel ist, sieht man bei kleinen Mondsicheln ganz schwach die dunkle Ergänzung der Mondkugel, d.h. die Nachtseite des Mondes[7].

A 6 Überlegungen zu den Phasen und der Bewegung des Mondes

a) Prüf die Behauptungen 1 bis 5 kritisch nach.

b) Kann man aus diesen 5 Thesen schliessen, dass der Mond um die Erde kreist?

Versuch zum Thema «Mondphasen» (Partnerarbeit)

Halte eine matte, nicht zu kleine Kugel ins Licht dier Sonne. Deine Partnerin betrachten die Licht-Schattengrenze auf der Kugel von verschiedenen Positionen aus. Dann Rollentausch. Merk Dir, von welchen Positionen aus man die Kugel als „Sichelmond“, als „Halbmond“ und als „Vollmond“ sieht.

A 7 Überlegung zur grauen Ergänzung der Mondsichel

Hier geht es um die zweite Strophe von Leonardo da Vincis „Mondlied“.

a) Zeichne schematisch die Stellungen von Sonne, Erde und Mond für den Fall, dass wir einen kleinen Sichelmond sehen. Schraffiere die von der Sonne nicht beleuchteten Hälften von Erde und Mond schwarz.

b) Wie würde nun eine Astronautin, die sich auf dem Mond befindet, die Erde sehen? Würde sie mehr von der dunklen oder mehr von der hellen Hälfte der Erde sehen?

c) Erkläre nun in einem kurzen Text, warum man gerade beim kleinen Sichelmond die Nachtseite des Mondes besonders gut sehen kann.

[7] GALILEO GALILEI: *Sidereus Nuncius*, hrsg. von Hans Blumenberg, Sammlung Insel, Frankfurt/M 1965, S. 98 ff.

2.4. Finsternisse

Wer das Zustandekommen der Mondphasen und die Beleuchtungsverhältnisse zwischen Sonne und Mond verstanden hat, muss sich fragen, warum es nicht bei jedem Neumond eine Sonnenfinsternis und bei jedem Vollmond eine Mondfinsternis gibt.

Nun läuft der Mond nicht genau auf derselben Bahn über den Himmel wie die Sonne. Er kann von der Sonnenbahn auf beide Seiten maximal 5° abweichen. Das scheint wenig zu sein, es sind aber 10 Vollmond-Durchmesser. Wenn der Mond die Sonnenbahn kreuzt, spricht man von einem Mondknoten.

A 8 Überlegung zu den Finsternissen

Formuliere die Bedingungen für das Zustandekommen einer Mondfinsternis und einer Sonnenfinsternis.

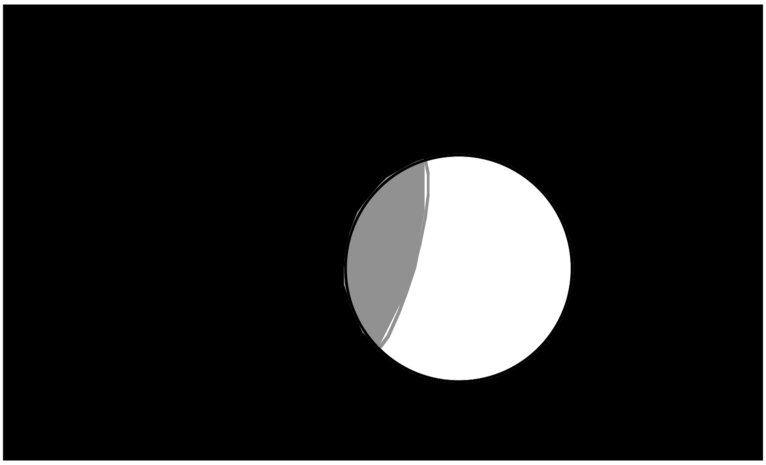

Abb. 4: Der Erdschatten auf dem Vollmond

Die Abb. 4 zeigt den Beginn einer totalen Mondfinsternis. Man sieht, wie sich der Schatten der Erde in den Vollmond „hineinfrisst".

An den Mondfinsternissen konnten die Gelehrten der Antike die Kugelgestalt der Erde direkt sehen. JOHANNES KEPLER hat einen Text von ARISTOTELES aus dem Alt-Griechischen in sein persönliches Schwäbisch übersetzt[8]:

> „Dan die Mondsfünsternussen würden nit solliche Schnitte geben (wan die Erd nit kugelrund wäre). Dan in den manicherlay bildungen durch den Monat, würt der Mond auf allerlay wege gethailet, einsmalhs gerad entzway, ein andermahl ausgehölet, dan buckelecht, oder baider orten rund. Jn den fünsternussen aber ist der schnitt der das helle von dem fünsteren thailet, allezeitt rund gebogen. Derowegen so der Mond sein liecht verleürt von wegen dessen, das jme die Erde im liecht stehet, so muss die eüssere Bildung des Erdbodens, wellicher kugelrund, ein Vrsach sein an sollicher gestalt des Monds."

[8] *Auseinandersetzung Johannes Keplers mit Aristoteles über die Bewegung der Erde*, in: NIKOLAUS KOPERNIKUS: *Erster Entwurf seines Weltsystems*, hrsg. & übers. von FRITZ ROSSMANN, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1986, S. 76.

Wer schon eine Mondfinsternis erlebt hat, ist vielleicht erstaunt, dass der Erdschatten nicht völlig dunkel ist, sondern in einem schmutzigen Braunrot erscheint. Warum?

Nach Sonnenuntergang wird es auf der Erde nicht augenblicklich dunkel. Der Himmel im Westen wandelt sein Gold mit zunehmender Dunkelheit in ein tiefes Rot. Und dieser rote Dämmerungshimmel beleuchtet den beschatteten Teil des Vollmondes. Das Rotbraun des Erdschattens auf dem Mond ist also eine Mischung aus den zarten Dämmerungsfarben der Erdatmosphäre und der schwarzgrauen Oberfläche des Mondes.

Der scharfe Innenrandes der Mondsichel zeigt, dass der Mond keine Atmosphäre hat. Gäbe es auf dem Mond eine Lufthülle wie auf der Erde, so könnten wir zwischen der Tages- und der Nachthälfte des Mondes ein unscharfes, farbiges Dämmerungsband sehen.

Zurück zur Mondfinsternis: Eine einzige Momentaufnahme zeigt uns nur einen kleinen Teil des Erdschattens. Dieser könnte im Prinzip auch von einer tellerförmigen Erde stammen. Oder die Erde könnte die Form einer Glocke haben usw.. Die Astronomen der Antike mussten also einige Mondfinsternisse beobachtet haben: solche, die am späten Abend stattfanden, Mitternachts-Finsternisse und auch solche in frühen Morgenstunden. Und erst, als man feststellte, dass der Rand des Erdschattens *immer* der Teil eines Kreises von gleicher Krümmung ist, folgte zwingend, dass die Erde eine im Raum frei schwebende Kugel ist.

Dieses Beispiel zeigt uns, wie schon die antike Naturwissenschaft methodisch vorgegangen ist: Die *Wahrnehmung* des Erdschattens ist unvollständig. Diese Wahrnehmung muss durch das *Denken* ergänzt werden: Welche Form hat ein Körper, der unter allen Beleuchtungsverhältnissen einen Schatten wirft, dessen Rand stets die gleiche Krümmung hat? *Naturwissenschaftliche Erkenntnis* kommt also durch eine Übereinstimmung von Wahrnehmen und Denken zustande.

Und wenn das Denken schon im Schwung ist, kann man den sichtbaren Teil des Erdschattens zum Kreis ergänzen. Dann erweist sich, dass der Erdschatten rund 3 mal so gross ist wie der Mond.

Wenn ein Mondknoten zeitlich mit einem Neumond zusammenfällt, kommt es zu einer Sonnenfinsternis. Der Mond kann die Sonne nur sehr knapp verdecken. Daher zeichnet sein Kernschatten nur eine schmale Spur auf die Erde. So muss man meistens eine grosse Reise unternehmen, um eine totale Sonnenfinsternis zu erleben: Man muss zur Schattenspur, die man *Totalitätszone* nennt, reisen. Wenn dann die Mondscheibe die Sonne völlig verdeckt, wird es mitten am Tag für einige Minuten dunkel wie in der Nacht. In seinem Essay „die Sonnenfinsternis“ beschreibt ADALBERT STIFTER[9] das zauberhafte Schauspiel, welches dann am Himmel zu sehen ist:

> ... der Mond stand mitten in der Sonne, aber nicht mehr als schwarze Scheibe, sondern gleichsam halb transparent wie mit einem leichten Stahlschimmer überlaufen, rings um ihn kein Sonnenrand, sondern ein wundervoller, schöner Kreis von Schimmer, bläulich, rötlich, in Strahlen auseinanderbrechend, nicht anders, als gösse die obenstehende Sonne ihre Lichtflut auf die Mondeskugel nieder, dass es rings auseinanderspritzte – das Holdeste, was ich je an Lichtwirkung sah!

[9] ADALBERT STIFTER: *Die Sonnenfinsternis,* Reclam 8850, Stuttgart 1963, S. 77.

Dieser „Kreis von Schimmer" ist die *Korona* der Sonne. Man sieht sie nur bei einer totalen Sonnenfinsternis. Sonne und Mond haben aber nicht immer genau denselben Abstand von der Erde. Wenn der Mond ausgerechnet dann am weitesten von uns entfernt ist, wenn wir der Sonne am nächsten stehen, kann er die Sonnenscheibe nicht völlig abdecken. Dann kommt es nur zu einer ringförmigen Sonnenfinsternis, bei der man die Korona nicht sieht. Sonnenfinsternisse zeigen, dass die Winkel-Durchmesser von Sonne und Vollmond von der Erde aus mit recht grosser Genauigkeit gleich gross erscheinen, nämlich 0.5°.

2.5. Aristarchs Blick auf den Halbmond

Der berühmte Mathematiker ARCHIMEDES VON SYRAKUS lebte von 287 bis 212 v. Chr. in Sizilien. Er schrieb einmal einen Brief an einen König Gelon mit dem sonderbaren Titel „die Sandzahl". Dieser Brief behandelt die Frage, wieviele Sandkörner in einer Kugel Platz hätten, die so gross ist wie das ganze Universum. Dazu musste Archimedes die Grösse des Universums abschätzen. So prüfte er die Ansichten der anderen Gelehrten, die sich darüber Gedanken gemacht hatten, z.B.[10]:

> Aristarch von Samos gab die Erörterung gewisser Hypothesen heraus, in welchen aus den gemachten Voraussetzungen erschlossen wird, dass der Kosmos ein Vielfaches der von mir angegebenen Grösse sei. Es wird nämlich angenommen, dass die Fixsterne und die Sonne unbeweglich seien, die Erde sich um die Sonne, die in der Mitte der Erdbahn liege, in einem Kreise bewege, die Fixsternsphäre aber, deren Mittelpunkt im Mittelpunkt der Sonne liege, so gross sei, dass die Peripherie der Erdbahn sich zum Abstande der Fixsterne verhalte wie der Mittelpunkt der Kugel zu ihrer Oberfläche. Es ist klar, dass dies unmöglich ist.

ARISTARCH VON SAMOS lebte um 280 v. Chr[11]. Er hat über etwas gestaunt, das wir alle (bei günstiger Witterung) zweimal pro Monat ohne viel Hilfsmittel selber nachprüfen können[12]: Der Halbmond steht immer in Quadratur zur Sonne. Wenn wir vom Halbmond zur Sonne blicken, müssen wir den Kopf stets um einen rechten Winkel drehen. Das scheint eigentlich ganz selbstverständlich zu sein, denn der Leermond steht in Konjunktion zur Sonne (0°) und der Vollmond in Opposition (180°). Also ist es logisch, dass der Halbmond in Quadratur (90°) zur Sonne steht.

Wenn das Sonnenlicht in einem rechten Winkel zu unserer Blickrichtung auf den Mond strahlt, sehen wir genau die Hälfte seiner beleuchteten Seite: Wir sehen den Halbmond. Dieser rechte Winkel befindet sich auf dem Mond. Er ist also nicht der rechte Winkel zwischen der Sonne und dem Halbmond, den wir auf der Erde messen könne. Das Dreieck Sonne-Mond-Erde scheint also zwei rechte Winkel zu haben!

---

[10] ARCHIMEDES: *Werke,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1972, S. 349.

[11] B. L. VAN DER WAERDEN: *Die Astronomie der Griechen,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1988, S. 131.

[12] CHRISTOPH RAEBIGER: *Was lehren uns des Mondes Licht- und Schattenphänomene?,* Naturwissenschaften im Unterricht (NiU) 4 (1993), Nr. 20. S. 14-20.

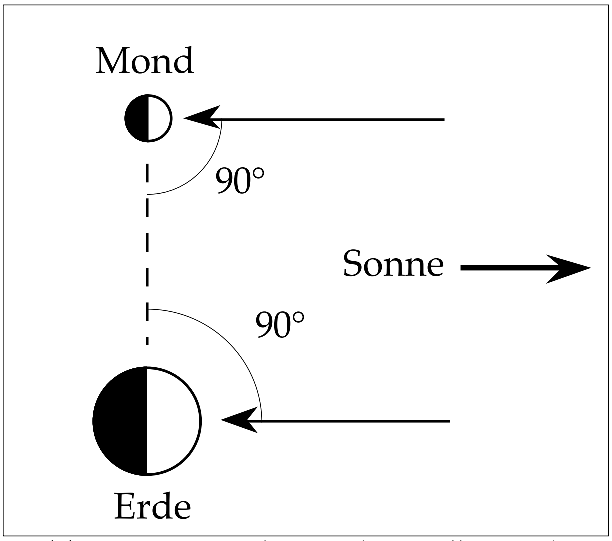

Abb. 5: Die Quadratur des Halbmondes

Der Winkel zwischen der Sonne und dem Halbmond ist natürlich nicht im streng geometrischen Sinne ein rechter. Er muss ja wegen dem Winkelsummensatz des Dreiecks etwas kleiner sein. Zudem ist die Schattengrenze auf dem Mond wegen der Mondgebirge nicht sehr genau bestimmbar.

Aristarch versuchte diese Winkel zu messen und kam zum völlig falschen Resultat, dass die Sonne 19 mal so weit entfernt ist wie der Mond. Sein Sonne-Mond-Erde-Dreieck sieht wie folgt aus:

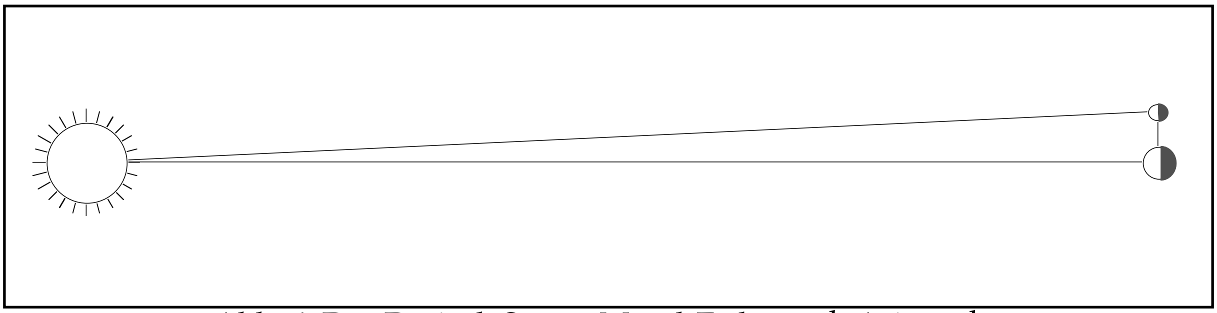

Abb. 6: Das Dreieck Sonne-Mond-Erde mach Aristarch

Die Astronomen haben inzwischen herausgefunden, dass die Sonne 390 mal so weit weg ist als der Mond. Wenn der Winkel Sonne-Mond-Erde genau 90° beträgt, so ist der Winkel Sonne-Erde-Mond nur 10 Bogenminuten kleiner als 90°!

Aber das Wichtigste konnte Aristarch in der Halbmond-Sonne-Konstellation *sehen:* Die Sonne ist sehr viel weiter von uns entfernt als der Mond.

Dazu hat er sich wohl folgendes gedacht: Die Sonne und der Mond laufen fast gleich schnell über den Himmel. Deine Abstände sind aber um Grössenordnungen verschieden. Das könnte man am einfachsten erklären, indem man annimmt, dass sich die Erde dreht. Das war allerdings nur eine Annahme.

Aristarch hatte aber noch ein stärkeres Argument: An den Mondfinsternissen sieht man, dass der Mond nicht sehr viel kleiner ist als die Erde. Und die Sonnenfinsternisse belehren uns, dass die Sonne soviel mal grösser ist als der Mond, wie sie weiter entfernt ist, als dieser. (Strahlensatz im wörtlichsten Sinn!) Wenn nun die Sonne sehr viel weiter entfernt ist, als der Mond, muss sie auch sehr viel grösser sein. Sie muss sogar viel grösser sein als die Erde. Und Aristarch glaubte nicht, dass ein grösserer Körper um einen kleineren als Zentrum rotieren könne.

Archimedes wusste auch, dass die Sonne grösser ist als die Erde. Ihn scheint das aber nicht gestört zu haben, sonst hätte er Aristarch nicht verspottet.

Diese Überlegung führt aber noch einen Schritt weiter. Aristarch hat nicht nur behauptet, dass die Erde um ihre eigene Achse rotiert, sondern dass sie auch Jahr für Jahr um die Sonne kreist. Und von der Bewegung der Erde um die Sonne müsste man doch auch etwas sehen können am Firmament.

2.6. Die Bewegungen des Sternenhimmels

Manche Menschen können sich unter dem Begriff „Himmelskugel" nicht viel vorstellen. Vielleicht haben sie zu früh gelernt, dass das Universum unendlich gross sei. Die Baumeister der Renaissance oder des Barock dagegen haben mit den Kuppeln der Dome den Himmel symbolisiert, und es kam für sie keine andere Form in Frage als die einer grossen Hohlkugel.

Wir können Nacht für Nacht erleben, dass sich die ganze Himmelskugel mit allen Sternen um einen Punkt dreht, der sich in der Nähe des Polarsterns befindet. Dieses Zentrum der Drehbewegung des Himmels heisst *nördlicher Himmelspol.* Diese Bewegung des Sternenhimmels war den Astronomen aller Zeiten und aller Kulturen genau bekannt, denn sie nahmen sich genügend Zeit zur Beobachtung[13]. Heute haben wir es eiliger und müssen uns mit gelegentlichen Blicken ins Firmament begnügen. Daher können uns Sternspuren-Fotos helfen, die Bewegungen am Himmel zu verstehen[14].

> Fotos mit Sternspuren kann man in klaren, mondlosen Nächten leicht selber herstellen. Dazu braucht man allerdings eine Kamera, deren Blende, Belichtungszeit und Distanz von Hand eingestellt werden kann, einen Drahtauslöser mit Arretierschraube und ein Stativ. Weitwinkelaufnahmen zeigen die Sternenbewegung eindrücklicher als Tele-Aufnahmen.
>
> Schraub die Kamera auf das Stativ. Befestige den Drahtauslöser auf den Abdruckknopf. Stell die Blende auf einen mittleren Wert, die Distanz auf ∞ und die Zeitskala auf «B». Öffne den Verschluss mit dem Drahtauslöser, damit die Kamera nicht wackelt und arretiere den Auslösestift mit dem Schräubchen. Danach lässt Du den Verschluss während etwa einer Stunde offen. Achte darauf, dass die Kamera dabei völlig ruhig stehen bleibt.

Sternspuren-Aufnahmen der Region um den Polarstern zeigen das Kreisen der Sterne um den nördlichen Himmelspol. Pro Jahr machen die Sterne eine Umdrehung mehr als die Sonne. Ein „Sternen-Tag" dauert also nicht 24 Stunden, sondern etwa 23 Stunden 56 Minuten (bitte nachrechnen).

---

13 DANIEL AHRENS: *Die Himmelsuhr, nach Wagenschein,* in: HANS CHRISTOPH BERG/THEODOR SCHULZE: *Lehrkunst – Lehrbuch der Didaktik,* Luchterhand, Neiwied 1995, S. 65-90.

14 ARGYRIS SFOUNTOURIS: *Sternbilder, Blicke in den Nachthimmel,* Ex Libris, Zürich.

Ganz anders erscheint der Lauf des bekannten Sternbildes *Orion:*

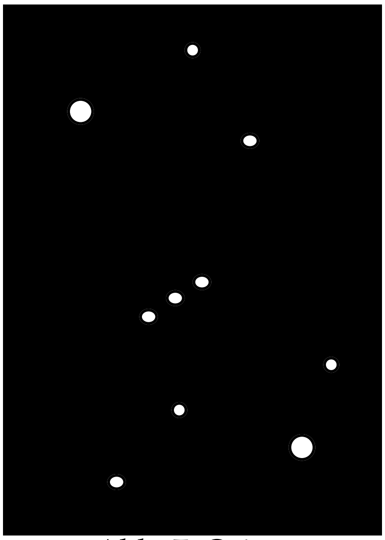

Abb. 7: Orion

Orion ist ein Wintersternbild. Er ist im Sommer in keiner Nacht und von keinem Ort der Erde aus zu sehen. Wo ist er geblieben? Hat man Orion im Winter einmal ins Auge gefasst und bleibt ihm dann über den Frühling hinweg auf der Spur, so verrät er ganz bereitwillig, wohin er sich versteckt: allmählich verkriecht er sich samt seiner ganzen Himmelsnachbarschaft in die Nähe der Sonne. Orion ist also auch im Sommer da, aber dann wird er vom Tageshimmel überstrahlt.

Eine Sternspuren-Aufnahme des Orion zeigt die Rotation der Himmelskugel quasi von der Seite: Die Spuren der oberen Sterne (z.B. der Beteigeuze) sind leicht gegen oben gekrümmt, die Spuren der unteren Sterne (z.B. Rigel) gegen unten. Die Spuren der drei Gürtelsterne dagegen verlaufen gerade[15].

Also: Alle Sterne der nördlichen Himmelshalbkugel umkreisen den nördlichen Himmelspol. Die Sterne der südlichen Hemisphäre umkreisen den südlichen Himmelspol, der in Südrichtung weit unter dem Horizont liegt.

Nun versteht man auch die verschiedenen Krümmungen der Sonnenbahn: Die Sommersonne beschreibt einen weiten Kreis um den nördlichen Himmelspol. Die Wintersonne dagegen umkreist den südlichen Himmelspol. Bei den Tag-Und-Nacht-Gleichen steht die Sonne auf dem *Himmelsäquator.* Das ist die Trennlinie zwischen den beiden Hemisphären. Dann läuft die Sonne auf gerader Bahn über den Himmel.

[15] Der oberste Gürtelstern des Orions sitzt weniger als 1° südlich vom Himmelsäquator.

A 9 Lernaufgabe mit der Sternkarte (Partnerarbeit)

a) Umgang mit einer Sternkarte[16]

Bei der Sternkarte dreht man nicht der Sternenhimmel, sondern den Standort des Beobachters: Das Oval auf der durchsichtigen, drehbaren Scheibe stellt den Horizont dar. Dort sind auch die Himmelsrichtungen eingezeichnet. Innerhalb des Horizont-Ovals findet man den Teil des Sternenhimmels, der beim eingestellten Datum und bei der eingestellten Uhrzeit am Himmel zu sehen ist. Der Zenit (Z) ist der höchste Punkt am Himmel des Beobachters.

- Stell die Sternkarte auf heute Abend, 22 Uhr ein und merk Dir zwei markante Sternbilder, die Du heute sehen wirst, wenn das Wetter es erlaubt.

b) der Polarstern

- Such das Sternbild *grosser Bär (Ursa Major).*
- Verlängere die Linie zwischen den beiden vordersten Sternen des grossen Bären etwa fünfmal (auf der Sternkarte siehst Du, in welcher Richtung).
- Der Polarstern (Polaris) ist der äusserste Stern des *kleinen Bären.* (Auf kleinen Sternkarten ist der Polarstern unter der Drehniete versteckt.)
- Bestimme den Winkel zwischen dem Himmelspol (dem Zentrum der Sternkarte) und dem nördlichen Horizont mit Hilfe des drehbaren Zeigers. Die Bedeutung dieses Winkel kannst Du erraten, wenn Du Dir vorstellest, wie gross er auf dem Nordpol wäre.

c) Sommer- und Wintersternbilder

- Such das Sternbild *Orion* auf der Sternkarte. Warum hat es dort eine andere, breitere Gestalt als auf Abb. 7, welche den Orion so zeigt, wie man ihn am Himmel sieht?
- Dreh den Zeiger auf das Datum der Winter-Sonnenwende (22. Dez).
- Dreh die durchsichtige Horizont-Scheibe, bis die Marke «24 h» auf dem Zeiger liegt. Der ovale Ausschnitt zeigt nun, was Du am 21. Dez. um Mitternacht am Himmel sehen kannst.
- Beschreibe, wohin man zu diesem Zeitpunkt in den Himmel blicken muss, um den Orion zu sehen (Himmelsrichtung und Höhe über dem Horizont).
- Stell den Zeiger auf das Datum der Sommer-Sonnenwende (22. Juni). Dreh die Scheibe, bis der Orion im ovalen Ausschnitt erscheint. In welchem Zeitintervall ist das der Fall? Nun solltest Du wissen, warum man den Orion im Sommer vergebens sucht.

d) Die Ekliptik und der Tierkreisgürtel

Die Bewegung der Sonne am Himmel kann man auf zwei verschiedene Arten beschreiben: Einerseits läuft die Sonne täglich von Osten nach Westen über den Tageshimmel. Andererseits läuft sie ganz langsam rückwärts durch den Sternenhimmel. Die Sonnenbahn auf der Himmelskugel heisst *Ekliptik*[17]*.* Die Sternbilder längs der Ekliptik sind die *Tierkreis-Sternbilder.*

- Der Schnittpunkt zwischen der Ekliptik und dem beweglichen Zeiger gibt die Position der Sonne am Himmel an.
- Such die beiden Kreuzungspunkte zwischen der Ekliptik und dem Himmelsäquator. Setz den Zeiger nacheinander auf diese Punkte und

---

[16] z.B. kleine SIRIUS-Sternkarte, Hallwag-Verlag, Bern.

[17] Die Bahn heisst Ekliptik, weil dort die Eklipsen, d.h. die Finsternisse stattfinden.

kontrolliere am Rand das Datum nach, an welchem die Sonne dort steht. Der eine Punkt heisst *Frühlings-* oder *Widderpunkt,* der andere *Herbst-* oder *Waagepunkt.*

- Bestimm nun Dein Tierkreis-Zeichen: Stell den Zeiger auf das Datum Deines Geburtstags. Auf der Ekliptik sind jeweils die Punkte angegeben, an denen die Sonne in ein neues Tierkreis-Zeichen eintritt. Such Dein Tierkreiszeichen auf der Ekliptik. Such auch Dein Tierkreis-Sternbild und das Sternbild, in welchem die Sonne an Deinem Geburtstag steht.

  Wenn Du Dein Sternzeichen genau wissen willst, musst Du die innere Datum-Skala verwenden, welche für die Sonnen-Position zuständig ist. Die Abweichung zwischen den beiden Daten-Skalen beträgt maximal 4 Tage und heisst in der Astronomen-Fachsprache *Zeitgleichung.*

e) die Präzession

Bestimmt haben Du Dich gefragt, warum die Tierkreis-*Zeichen* nicht mit den Tierkreis-*Sternbildern* übereinstimmen. Sternbild und Zeichen sind um etwa einen Monat verschoben. Zu Beginn unserer Zeitrechnung, also vor über 2000 Jahren, stimmten die Zeichen mit den Bildern überein. Die langsame Verschiebung zwischen Tierkreiszeichen und Tierkreis-Sternbildern nennen die Astronomen *Präzession.*

Berechne die Dauer eines *Weltenjahrs.* Das Weltenjahr heisst auch *platonisches Jahr* und ist das Zeitintervall, in welchem sich die Übereinstimmung von Zeichen und Bildern jeweils wiederholt.

f) die Jahreszeiten

Stell den Zeiger der Sternkarte auf das Datum der Sommer-Sonnenwende (22. Juni). Prüf Deine Einstellung nach, indem Du die Horizont-Scheibe so einstellst, dass die Marke «12 h» auf dem Zeiger liegt. Beschreibe genau, aus welcher Richtung die Sonne scheint (Himmelsrichtung und Höhenwinkel).

- Wiederhol diese Übung für die Winter-Sonnenwende. Was bedeutet die Differenz zwischen den Mittags-Höhenwinkeln der Sommer- und der Wintersonne?
- Bestimm die Zeit des Sonnenauf- bzw. -untergangs:
  Stell den Zeiger auf das gewünschte Datum. Dreh die Sternkarte, bis die ovale Horizont-Linie die Sonnen-Position schneidet (Schnittpunkt Zeiger-Ekliptik). Auf der Skala der Horizont-Scheibe kannst Du die Zeit des Sonnenauf- bzw. -untergangs ablesen. (Bei den Zeitangaben auf der Sternkarte handelt es sich um die Ortszeit, nicht um die Zonenzeit, und schon gar nicht um die Sommerzeit). Bestimm die Tageslänge Deines gewählten Datums. Vergleich die Längen von Sommer- und Wintertagen.

A 10 Überlegung zur Bewegungen der Himmelskörper

Mit Hilfe der Sternkarte hast Du die Bewegungen simuliert, die sich am Himmel zeigen, wenn man übers Jahr gelegentlich die Sterne beobachtet.

a) Welche dieser Bewegungen können gedeutet werden
- als Folge der Achsendrehung der Erdkugel,
- als Folge der jährlichen Bewegung der Erde um die Sonne?

Begründe Deine Antwort in einem kurzen Text.

b) Welches ist nun die genaue Umlaufsdauer der Achsendrehung der Erde? Die Antwort ist zu begründen.

c) Hast Du damit *bewiesen,* dass die Erde sich dreht und dass sie sich um die Sonne bewegt?

A 11 Rollenspiel zum Thema „Wintersternbilder“

Oft werden die Verhältnisse am Himmel klarer, wenn man sie szenisch darstellt. Vorschlag für eine Inszenierung:
- Man zeichnet den Orion an die Wandtafel.
- Eine Schülerin stellt sich als „Sonne“ in grossem Abstand zum „Orion“ ins Zentrum.
- Ein Schüler, die „Erde“, umkreist die „Sonne“. Wenn „die Erde“ zwischen der „Sonne“ und dem Orion steht, ist es Winter. Wenn die „Erde“ von dort zur „Sonne“ schaut, ist es Tag. Schaut „die Erde“ zum Orion, ist es Nacht. Wenn die „Erde“ hinter der „Sonne“ steht, ist es Sommer. Wenn nun die „Erde“ den Orion anschaut, steht die „Sonne“ davor.
- Während die „Erde“ die „Sonne“ umkreist, muss sie sich stets im gleichen Drehsinn um sich selbst drehen. Mit etwas Konzentration sieht man dann auch, dass sich die „Erde“ auf ihrem Lauf jeden Tag etwas mehr als 360° drehen muss, um die „Sonne“ wieder zu sehen. Der Sonnentag dauert also etwas länger als eine volle Umdrehung der Erde.
- Diese Erfahrung wird auf die richtige Erde übertragen: In 24 Stunden dreht sich die Erde etwas mehr als 360°. Ihre wahre Umlaufsdauer entspricht der Dauer einer Umdrehung des Sternenhimmel und beträgt $23^h56^m07^s$.

3. Erste Erklärungen von Phänomenen

Naturwissenschaftliche Erkenntnisse entstehen, wenn die Phänomene nach den Regeln der Naturwissenschaft interpretiert werden. Als erstes Beispiel wollen wir die Geschwindigkeit des Mondes auf seinem Lauf um die Erde berechen. Dazu muss man seine Entfernung von der Erde und seine Umlaufszeit um die Erde und kennen. Das ist nicht ganz einfach, denn wir sehen die Bewegung des Mondes von der bewegten Erde aus.

3.1. Die Rhythmen des Mondes

Der bekannteste Rhythmus des Mondes ist die Periode der Mondphasen, d.h. das Zeitintervall zwischen zwei Vollmonden. In jedem Kalender, in dem die Mondphasen eingetragen sind, kann man nachsehen und dann nachrechnen, dass die Periode der Mondphasen im Mittel 29.5 Tage beträgt. Dies nennt man einen *synodischen Monat.* In jedem synodischen Monat wird der Mond einmal von der Sonne überrundet. Die Sonne überholt den Mond jeweils bei Neumond. Und seine tägliche Verspätung bezüglich der Sonne beträgt fast 50 Minuten (bitte nachrechnen). Ein „Mond-Tag“ dauert also $24^h\ 50^m$: Sieht man den Mond am Himmel, so muss man 24 Stunden und 50 Minuten warten, bis er wieder an derselben Stelle steht. Nicht genau an derselben Stelle, denn er ist dann meistens etwas höher oder etwas tiefer als in der Nacht zuvor, denn auch der Mond macht eine ähnliche Bewegung wie die Sonne: Er steigt vom Sternzeichen des Steinbocks in den Krebs hinauf und wieder hinunter in den Steinbock.

Die Periode des Mondes in seinem Lauf durch den Tierkreisgürtel könnte man ein „Mondenjahr“ nennen. Man nennt sie aber den *siderischen* Monat. Seine Dauer berechnet sich wie folgt:

- Die Sonne überrundet den Mond $\frac{365.25\ \text{Tage}}{29.5\ \text{Tage}} = 12.38$ mal pro Jahr.

  Das Jahr enthält bekanntlich 12 Kalendermonate, aber 12.38 synodische Monate.
- Die Sterne drehen sich pro Jahr einmal mehr um uns als die Sonne. Sie umrunden den Mond also 13.38 mal pro Jahr. Ein Jahr dauert 13.38 siderische Monate.
- Der siderische Monat dauert demnach $\frac{365.25\ \text{Tage}}{13.38} = 27.3\ \text{Tage}$

A 12 Überlegung zur Bewegung des Mondes

Welches ist nun die wahre Umlaufsdauer des Mondes um die Erde:
- die tägliche Periode (der „Mond-Tag“) von $24^h 50^m$,
- der synodische Monat (die Periode der Mondphasen) von 29.5 Tage ,
- der siderische Monat (das „Mond-Jahr“) von 27.3 Tage?

Die Antwort ist zu begründen.

3.2. Die Entfernung des Mondes

Der berühmte Astronom HIPPARCH VON NICÄA hat um 130 v. Chr. die Distanz zum Mond berechnet[18]. Für unsere Ansprüche vereinfachen wir Hipparchs Verfahren ein wenig.

Wir stellen uns vor, dass ein Astronomin den Sonnenuntergang betrachtet. Zudem bemerkt sie, dass hinter ihr gleichzeitig der Vollmond aufgeht. Nach einer Weile ungetrübten Genusses dieses Phänomens entschliesst sie sich, die Sache geometrisch zu analysieren. Dazu erstellt sie die folgende Skizze:

[18] VAN DER WAERDEN: S. 189

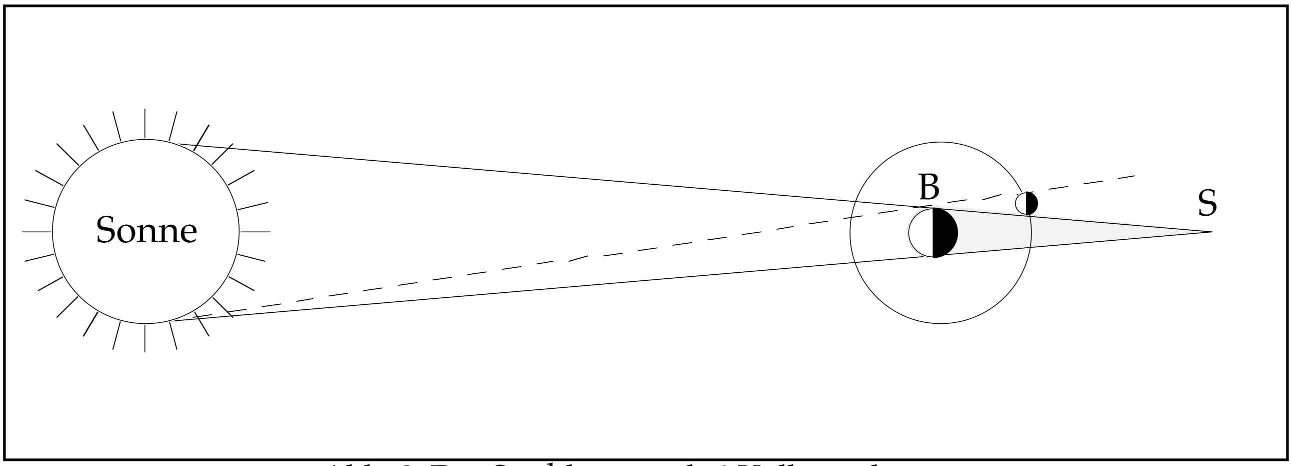

Abb. 8: Der Strahlengang bei Vollmond

Konstruktionsanleitung:

1. Zuerst die Sonne einzeichnen und dann die beiden Strahlen, die zu S führen. S sollte möglichst weit von der Sonne entfernt sein.
2. Zwischen diese beiden Strahlen die Erde einpassen. Das punktierte Gebiet hinter der Erde bis zum Punkt S symbolisiert den Kernschatten der Erde. In Wirklichkeit ist der *Kernschatten* der Erde kein Dreieck, sondern ein Kreiskegel, weil Sonne und Erde keine Kreise sind, sondern Kugeln. Der Kernschatten ist das Gebiet, von dem aus man die Sonne nicht sehen kann. Dort ist es Nacht.
3. Die Bahn des Mondes soll kleiner sein als die Hälfte des Strahles BS des Kernschatten. B sei der Beobachter-Standort auf der Tag-Nacht-Grenze der Erde. Von B aus sieht man die Sonne unter- und den Vollmond aufgehen (oder umgekehrt).
4. Nun zeichnen wir gestrichelt noch einen dritten Strahl ein, der vom unteren Rand der Sonne zu B führt. Diesen Strahl verlängern wir sogleich bis zur Mondbahn. Denn wir wissen:
5. Sonne und Mond erscheinen von der Erde aus gesehen gleich gross. Damit ist unser neuer Strahl zugleich der Lichtstrahl, der vom oberen Rand des Mondes zu B führt. So können wir den Mond unmittelbar neben dem Kernschatten der Erde einpassen.

Auswertung der Figur:

R_e = Radius der Erde; $D_e = 2R_e$ = Durchmesser der Erde,

D_m = Durchmesser des Mondes.

r = Radius der Bahn des Mondes = Entfernung Erdmittelpunkt–Mond,

s = Durchmesser des Erdschattens beim Mond.

Auf einer Fotografie, die den Erdschatten auf dem Vollmond zeigt, (oder auf der Abb. 4) kann man das Verhältnis der Durchmesser des Erdschattens und des Mondes abschätzen:

Das Foto der Mondfinsternis liefert $s : D_m \approx 2.7 : 1$

Weil die Sonne sehr viel weiter von der Erde entfernt ist als der Mond, dürfen wir den untersten Sonnenstrahl und die gestrichelte Linie auf der Abb. 8 als parallel betrachten.

Damit gilt: $s + D_m \approx D_e$

$$s : D_m = 2.7 : 1 \text{ und } s + D_m \approx D_e \Rightarrow D_e \approx 3.7\, D_m$$

Der Durchmesser des Mondes ist also 27% des Erddurchmessers (bitte nachrechnen). Damit haben wir die wahre Grösse des Mondes mit der wahren Grösse der Erde verglichen, d.h. wir kennen nun die wahre Grösse des Mondes:

$$D_m \approx 0.27\ D_e.$$

Nun können wir auch die Distanz zum Mond ausrechnen: Der Durchmesser des Vollmonds erscheint uns unter einem halben Winkelgrad, genauer: im Mittel unter 31 Bogenminuten. Oder, anders ausgedrückt: Auf der ganzen Mondbahn hätten 700 Monde Platz (bitte nachrechnen):

$$\frac{2\pi r}{D_m} = \frac{360 \cdot 60'}{31'} \approx 700$$

Schliesslich kombinieren wir die beiden Rechnungen:

$$2\pi r = 700 \cdot D_m = 700 \cdot 0.27 \cdot D_e$$
$$r \approx 30\ D_e = 60\ R_e.$$

Der Mond ist also etwa 60 Erdradien von uns entfernt. Das entspricht auch dem Ergebnis, welches Hipparch erhalten hat.
Etwas präziser ausgedrückt: Die Entfernung zwischen dem Erd- und dem Mondmittelpunkt beträgt 60.3 Erdradien.
Im heute gebräuchlichen Masssystem sind

- der Erdradius R_e = 40'000 km/2π = 6370 km und
- der Bahnradius des Mondes; r = 60.3 · 6370 km = 384'000 km.

3.3. Die Geschwindigkeit des Mondes

Mit seinem Bahnradius und der Umlaufszeit können wir die Geschwindigkeit das Mondes nach dem Rezept «Geschwindigkeit gleich Weg durch Zeit» ausrechen. Als Weg setzen wir den der Umfang der Mondbahn ein, als Zeit die Dauer des siderischen Monats. Wie bei der Drehung der Erde beziehen wir uns auch bei der Bewegung des Mondes auf die Sterne. Weil sie so weit weg sind und die Sternbilder über Jahrhunderte die gleiche Gestalt behalten, bildet der Sternenhimmel einen zuverlässigsten Bezugsrahmen für die Bewegungen der Himmelskörper des Sonnensystems.

$$\text{Weg: } s = 2\pi r \qquad \text{Zeit: } t = T_{sid}$$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{T_{sid}} = \frac{2\pi \cdot 384\,000\,\text{km}}{27.3\,\text{Tage}} = \frac{2\,410\,000\,\text{km}}{2\,360\,000\,\text{s}} = 1.02\frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Ist das schnell oder langsam? Bezüglich der Lebenswelt der Menschen läuft der Mond sehr schnell, nämlich mit dreifacher Schallgeschwindigkeit. Bezüglich sich selber läuft der Mond eher langsam.

A 13 Übung zur Geschwindigkeit des Mondes
Berechne die Zeit, die der Mond braucht, um seinen eigenen Durchmesser zu durchlaufen.

3.4. Geo-Metrie nach Eratosthenes

HIPPARCH hat die Entfernung des Mondes in der Masseinheit „Erdradien" angegeben. Aber wie kann man den Erdradius messen? Dies ist zum ersten Mal dem griechischen Geometer ERATOSTHENES gelungen, der im dritten Jahrhundert vor Christus lebte. Geometrie heisst Erd-Vermessung. Eratosthenes hat also Geometrie im wörtlichsten Sinn betrieben. Dabei setzte er voraus:

1) Die Erde ist kugelförmig (das zeigen die Mondfinsternisse).
2) Alle Sonnenstrahlen fallen quasi parallel zueinander auf die Erde. Das setzt voraus, dass er von der riesigen Entfernung der Sonne wissen musste.

Im oberen Tal des Nils nahe dem heutigen Assuan gab es in der Stadt Syene einen sehr tiefen Ziehbrunnen. In den Tagen der Sommersonnenwende schien die Sonne jeweils am Mittag bis auf den Grund dieses Brunnens. Offenbar stand sie dann genau im Zenit. In der Hafenstand Alexandra, die nördlich von Syene liegt, stand die Sonne zur gleichen Zeit um 7°12′ südlich vom Zenit. Diesen Winkel konnte man mit Hilfe des Schattens eines hohen Obelisken leicht ausmessen. Da die beiden Städte an der vielbenutzten Karawanenstrasse durch das Niltal lagen, war ihre Entfernung recht genau bekannt.

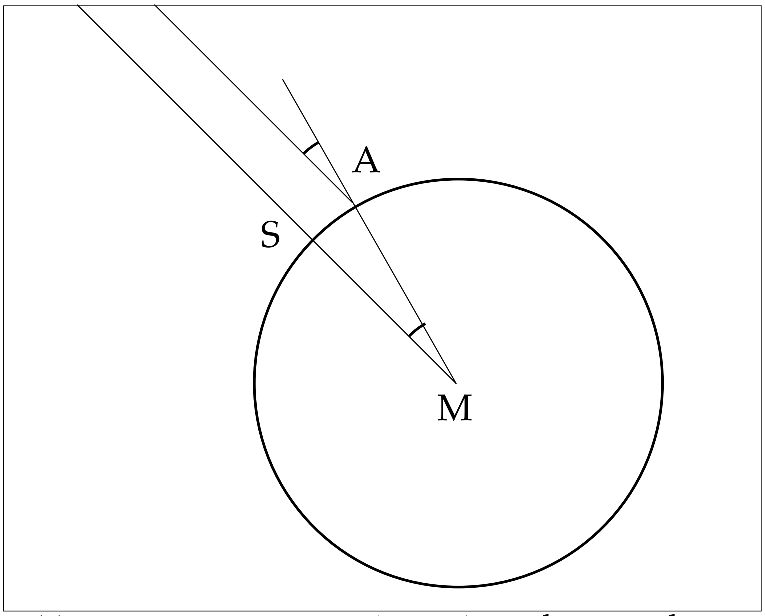

Abb. 9 Die Vermessung der Erde nach Eratosthenes

Die Abb. 9 zeigt, dass sich die Lote von Syene und Alexandria im Erdmittelpunkt auch unter einem Winkel von 7°12′ schneiden würden. 7°12' ist ein Fünfzigstel des vollen Winkels. Also ist der Erdumfang 50 mal so gross, wie die Strecke Syene-Alexandria.

Bis zur Zeit der französischen Revolution waren die Längenmasse auf der Erde alles andere als einheitlich, was natürlich zu üblen Streitereien führte. Die Revolutionäre wollten nun ein international gültiges Längenmass schaffen. Man teilte den

Erdumfang – genauer: den Erdmeridian, der durch Paris geht – in 40 Millionen Teile und stellte das Urmeter her, das als Standardmass für alle Massstäbe der Welt verbindlich war. Dieses Urmeter besteht aus einer Platin-Legierung und liegt im „Amt für Mass und Gewichte“ in Sèvres bei Paris. Sicher ist es richtig zu sagen, der Erdumfang betrage 40 000 km oder 40 Millionen Meter. Aber eigentlich wäre sachgemässer, zu sagen: Das Metermass ist der 40-Millionste Teil der Erdumfangs. Und die erste Vermessung des Erdumfangs verdanken wir ERATOSTHENES.

3.5. Wie sieht das Licht aus?

Die Licht- und Schattenphänomene des Mondes legen nahe, dass wir uns auch Fragen zum Fachgebiet «Optik», der Lehre des Lichts stellen, insbesondere die Kardinalfrage der Optik: Wie sieht das Licht aus?

Wenn es Nacht wird, tauchen wir in den Kernschatten der Erde ein. Die Zone, in die kein Sonnenlicht hinstrahlen kann, hat die Form eines Kegels der bei der Tag-Und-Nacht-Grenze der Erde beginnt (punktiertes Gebiet auf Abb. 8). Wenn wir uns irgendwo in diesem Kernschattenkegel aufhalten, sehen wir nichts von der Sonne. Im Kernschatten der Erde herrsch überall Nacht. Im Vergleich zum ganzen Sonnensystem sind die Erde und ihr Kernschattenkegel allerdings winzig klein. Und nur in dieser Schattenzone ist es dunkel. Von dort aus sehen wir den Nachthimmel, die Sterne, die Planeten und allenfalls den Mond. Dieser, obwohl selber ein dunkelgrauer Gesteinsklumpen, leuchtet silberhell. Damit zeigt er uns eindrücklich, dass wir auch in der Nacht von einer Fülle von Sonnenlicht umgeben sind. Davon sehen wir allerdings nichts, denn das Licht selber ist unsichtbar. Was wir sehen, sind die Dinge, die selber leuchten, wie die Sonne, das Feuer oder Lampen. Oder wir sehen die Dinge, die im Licht stehen, wie den Mond, die Planeten und die meisten Dinge, die wir normalerweise sehen[19]. Das Licht selber ist weder hell noch farbig. Es besteht auch nicht aus Strahlen.

Lichtstrahlen sind nichts anderes als von uns konstruierte Linien, mit deren Hilfe wir den Weg des Lichts besser verstehen können. Mit Hilfe der Lichtstrahlen kann man *geometrische Optik* treiben, wie wir es zur Ermittlung der Entfernung des Mondes gemacht haben. Lichtstrahlen sind also eine Modellvorstellung für die Ausbreitung des Lichts[20].

[19] MARTIN WAGENSCHEIN: *Das Licht und die Dinge,* in M. W. *Naturphänomene sehen und verstehen,* Klett, Stuttgart 1980, S. 113.

[20] Lichtwellen oder Licht-Teilchen (Einsteins Lichtquanten, die man auch Photonen nennt) sind ebenfalls nichts anderes als Modellvorstellungen vom Licht.

4. Das heliozentrische Weltbild

Ob wir uns erinnern oder nicht: Irgend einmal mussten wir als Kinder den Gedankensprung machen, dass unser Wohnhaus, unser Quartier, unser Dorf oder unsere Stadt kleine Teile der Oberfläche einer riesigen Kugel sind, die frei schwebt. Und wie jeder einzelne Mensch musste auch die Menschheit als Ganzes einen solchen Sprung ins Nichts wagen. Solche fundamentalen und sprunghaften Änderungen einer Überzeugung nennt man in der Wissenschaftstheorie *Paradigmawechsel*[21]. Der Paradigmawechsel zum heliozentrischen Weltbild vollzog sich in drei Schritten:

1. Die Erde ist eine Kugel, die frei im Weltraum schwebt.
2. Diese Kugel dreht sich um ihre eigene Achse
3. Die Erde ist ein Planet wie Merkur, Venus, Mars Jupiter und Saturn. Alle Planeten kreisen um die Sonne (heliozentrisches Weltsystem).

Schon im 6. Jahrhundert vor Christus wussten die Schüler des PYTHAGORAS, dass die Erde kugelförmig ist. Der Beweis dafür ist uns aber erst von ARISTOTELES überliefert: Bei den Mondfinsternissen zeigt der Schatten der Erde die Kugelgestalt (Kap. 2.3).

Die Schritte 2) und 3) wurden meisten zusammen vollzogen. Wie im Kap. 2.4. beschrieben wurde, hat ARISTARCH VON SAMOS schon um 280 v.Chr. ein heliozentrisches Weltsystem entworfen. Aber dieser Gedanke war seiner Zeit so weit voraus, dass er rasch wieder vergessen wurde. Im Mittelalter war sogar die Vorstellung von der Kugelgestalt der Erde wieder aus dem Bewusstsein der meisten Menschen verschwunden.

Erst im Jahre 1512 verschickte NIKOLAUS KOPERNIKUS einen ersten Entwurf seines Weltsystems an einige Gelehrte[22]. Er hatte das System des Aristarch weiterentwickelt. Allerdings ist das kopernikanische System ausserordenlich kompliziert und weder massstäblich richtig noch physikalisch begründet. Zudem hat Kopernikus die Sonne nicht genau ins Zentrum der Welt gesetzt; sein Weltbild ist also nicht heliozentrisch.

Das bekannteste Buch über das heliozentrische Weltsystems ist wohl GALILEO GALILEIS „Dialogo". Dieses Buch hat ihn vors Gericht der Inquisition gebracht. Der erste, welcher ein massstäblich richtiges Schema der Planetenbahnen um die Sonne gezeichnet hat, war ein Zeitgenosse Galileis: JOHANNES KEPLER, der von 1575 - 1630 lebte. Keplers Hauptwerk[23] mit dem Titel „Harmonices Mundi" erschien 1619. Aber Kepler und Galilei konnten das heliozentrische Weltbild weder physikalisch begründen noch hatten sie einen Beweis für dessen Richtigkeit.

Dem englischen Physiker ISAAC NEWTON, der von 1643 – 1727 lebte, ist es gelungen, Keplers Weltbild physikalisch zu begründen. Diese Begründung ist der Hauptinhalt seines Hauptwerkes „Philosophiae naturalis principia mathematica", das 1665 erschienen ist. In den „Principia" hat er aber auch die theoretischen Grundlagen der klassischen Physik gelegt[24].

---

21 THOMAS S. KUHN: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen,* Suhrkamp, Frankfurt/M 1989.

22 NIKOLAUS KOPERNIKUS: *Erster Entwurf seines Weltsystems,* hrsg. & übers. von FRITZ ROSSMANN, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1986, S. 76.

23 JOHANNES KEPLER: *Weltharmonik,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1978.

24 ISAAC NEWTON: *Mathematische Prinzipien der Naturlehre,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1963,

Diese Entstehungsgeschichte unserer Welterkenntis von den Anfängen bis zu Newton hat der Schriftsteller ARTHUR KOESTLER in seinem Buch „Die Nachtwandler" ausführlich und spannend dargestellt[25].

5. Gegenargumente

Wer heutzutage die Drehung der Erde und das heliozentrische Weltsystem bezweifelt, wird kaum noch ernst genommen Dabei hatte man bis zur Zeit der französischen Revolution keinen einzigen Beweis für die Drehung der Erde (siehe nächstes Kapitel). Und das heliozentrische Weltsystems konnte erst 1848 bewiesen werden (siehe letztes Kapitel). Galilei wurde nicht nur aus Arroganz der Inquisition verurteilt; es gab auch sachliche Argumente, welche gegen das damals neue Weltbild sprachen. Um aufgeklärt über die Drehung der Erde und deren Wanderung um die Sonne Bescheid zu wissen, müssen wir uns auch mit solchen Gegenargumenten auseinandersetzen.

5.1. Ein Argument, das gegen die Drehung der Erde spricht

Das Buch, welches Galilei vor das Gericht der Inquisition gebracht hat, trägt den Titel *Dialog über die beiden Weltsysteme.* Darin diskutieren die drei Gesprächspartner SALVIATI, SAGREDO und SIMPLICIO über die Frage, ob die Erde als Zentrum der Welt unbeweglich sei oder ob sie sich drehe. Wie kann man feststellen, was nun wirklich zutrifft? SALVIATI berichtet in einer langen Rede[26]:

> „Aristoteles also behauptet, das sicherste Argument für die Unbeweglichkeit der Erde sei die Beobachtung, dass senkrecht in die Höhe geschleuderte Körper längs derselben Linie an den nämlichen Ort zurückkehren, von dem aus sie geworfen wurden; und zwar auch dann, wenn die Bewegung sich sehr weit in die Höhe erstreckte. Dies aber könnte nicht der Fall sein, wenn die Erde sich bewegte; denn während der Zeit, wo der geschleuderte Körper, getrennt von der Erde, sich auf- und abwärts bewegt, würde der Ausgangspunkt des geschleuderten Körpers sich infolge der Erdumdrehung ein bedeutendes Stück nach Osten verschoben haben ... ."

Und SIMPLICIO bekräftigt Aristoteles mit einem anschaulichen Beispiel:

> „Abgesehen davon haben wir ja den eigens hiefür ersonnenen Versuch mit dem Steine, den man von der Spitze eines Schiffsmastes herabfallen lässt und der, wenn das Schiff feststeht, am Fusse des Mastes anlangt, der aber, wenn das Schiff sich weiter bewegt, um ebensoviel von diesem Punkte entfernt niederfällt, als das Schiff während des Falles vorwärts gekommen ist; dies beträgt mehrere Ellen, wenn das Schiff schnell fährt."

---

[25] ARTHUR KOESTLER: *Die Nachtwandler,* Suhrkamp-Taschenbuch 579.

[26] GALILEO GALILEI: *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1982, S. 145.

A 14 Überlegung zum Galilei-Dialog

a) In welche Himmelsrichtung sollten in die Höhe geworfene Körper infolge der Drehung der Erde abgedriftet werden, wenn die Theorie von Aristoteles richtig ist?
b) Ein Stein, der von der Spitze des Mastes eines fahrenden Segelschiffs herunterfällt, prallt tatsächlich hinter dem Fuss des Mastes auf das Deck. Aus welchen Gründen wird er nach hinten abgelenkt?
c) Wohin fällt ein Ball, der in einem geradeaus fahrenden Schnellzug genau lotrecht in die Höhe geworfen wird?
d) Welche Schlüsse bezüglich des Nachweises der Erddrehung kann man aus den Ergebnissen der Aufgaben a) bis c) ziehen?

5.2. Ein Argument, das gegen das heliozentrische System spricht

Wenn die Erde um die Sonne kreist, dann ändert sich ihr Abstand zu den Sternen andauernd. Nehmen wir als Beispiel die Zwillinge Castor und Pollux. Im Januar zeigen sie sich um Mitternacht im Süden. Dann sind sie also in Opposition zur Sonne, und ihre Distanz zur Erde ist minimal. Der Abstand zwischen Castor und Pollux müsste dann nach den Gesetzen der Perspektive am grössten erscheinen. Aber von solchen Schwankungen der Distanzen zwischen den Fixsternen im Laufe des Jahres war nicht eine Spur festzustellen! Entweder ist das heliozentrische System falsch, oder die Distanzen zu den Sternen muss quasi „unendlich“ viel grösser sein als die Entfernung zur Sonne. Wenn der Durchmesser der Erdbahn im Vergleich zum Abstand zu den Sternen vernachlässigbar klein ist, merkt man nämlich nichts von ihrer *jährlichen Parallaxe,* wie die Astronomen diese scheinbaren Positionsschwankungen nennen (siehe Kap. 9). Aristarch von Samos hat sich für die zweite Möglichkeit entschlossen. Darum wurde er von Archimedes und von den meisten seiner Zeitgenossen nicht ernst genommen.

6. Die Ostabweichung

6.1. ISAAC NEWTON macht einen interessanten Vorschlag

Die Legende berichtet, dass GALILEO GALILEI während seines Aufenthaltes in Pisa (zwischen 1581 und 1585) Steine vom schiefen Turm fallen liess. Damit, so wird berichtet, wollte er die Behauptung des ARISTOTELES nachprüfen, wonach schwerere Steine weniger Zeit zum Fallen benötigen als leichtere Steine.

Zur Zeit der französischen Revolution, also mehr als 200 Jahre nach Galileis Fallversuchen, liess der italienische Geometer GIOVANNI BATTISTA GUGLIELMINI im *Torre degli Asinelli*, dem höheren der beiden schiefen Türme[27] in Bologna, Bleikugeln fallen. Natürlich ging es ihm dabei nicht um eine Wiederholung von Galileis

[27] Solche Türme nennt man „Geschlechtertürme“. Sie wurden im Mittelalter im Auftrag der adligen Familien gebaut, und ihre Höhe war eine Art Statussymbol. Sie wurden offenbar absichtlich schief gebaut, womit die Baumeister ihr Können unter Beweis stellen wollten. Im 12. Jhd. sah Bologna fast so aus wie Manhattan. Heute gibt es nur noch vier Geschlechtertürme in Bologna, hingegen wird das Stadtbild von St. Gimignano in der Toscana von diesen skurrilen Bauwerken bestimmt.

Fallversuchen. Worum es Guglielmini ging, berichtet ein Hamburger Gelehrter, ein Herr Doktor BENZENBERG, der später ebenfalls solche Fallversuche machte[28]

> Im Jahre 1679 that NEUTON den ersten Vorschlag zu Versuchen über die Umdrehung der Erde. – Die Nachricht darüber befindet sich in *the History of the Royal Society of London by Bird.* – Ich will alles, was sich hievon in der Geschichte der Akademie findet, hier anführen.
>
> Versammlung im Hause des Präsidenten WILLIAMSON vom 3. Dec. 1679.
>
> Dr. HOOK zeigte einen Brief von Herrn NEUTON vor. ... Er gab einen Versuch an, wonach entschieden würde, ob die Erde sich täglich bewege oder nicht. – Wenn man nämlich einen Körper von einer grossen Höhe fallen ließ, so müße er östlich von der Senkrechten niederfallen, wenn die Erde sich bewege. Dieser Vorschlag NEUTONS fand bey der Akademie großen Beyfall, und sie verlangte, daß der Versuch, sobald es die Umstände erlauben, angestellt werde.

Mit „NEUTON" ist natürlich SIR ISAAC NEWTON gemeint.

A 15 Überlegungsaufgabe

Warum hat Newton eine *Ost*-Abweichung fallender Körper erwartet?

- Zeichne dazu die Erdkugel und einen hohen Turm auf den Äquator.
- Stell Dir vor, dass jemand einen Stein von der Spitze dieses Turmes fallen lässt. Warum sollte der Stein infolge der Drehung der Erde *vor* dem Fuss des Turmes auf den Boden prallen?

Dr. Benzenberg erklärt die Ostabweichung wie folgt[29]:

> ... Die Abweichung nach Osten, von der NEUTON sprach, kommt, weil die Kugel von einer Stelle fällt, wo sie weiter von der Erdachse ist, als unten ihr senkrechter Punkt, und wo sie folglich auch einen größeren Schwung nach Morgen hat, als dieser. Da sie nun während des Falls ihren größeren Schwung nicht verliert, so muß sie dem senkrechten Punkt im Fußboden voreilen, weil dieser eine kleinere Geschwindigkeit nach Morgen hat, – wenn sich die Erde um ihre Achse dreht; – dreht sie sich aber nicht um ihre Achse, so bleibt die Kugel während der ganzen Zeit ihres Falls immer über dem senkrechten Punkt und trifft diesen beym Aufschlagen.

6.2. GUGLIELMINIS Fallversuche

Wer die folgenden Ausschnitte aus Benzenbergs Bericht über GUGLIELMINIS Versuche liest, begreift, warum über 200 Jahre seit Newtons Vorschlag verstrichen sind, bis er realisiert wurde[30]:

> Der Thurm *degli Asinelli* ist zu diesen Versuchen sehr geschickt, Er ist über 300 Pariser Fuß hoch, – er ist mehrere Jahrhunderte alt, und liegt mitten in der Stadt. ... Oben schließt ihn ein Gewölbe, auf dem ein Thürmchen von 33 Fuß Höhe ist, in welchem sich eine Glocke zu bürgerlichem Gebrauch

[28] DR. BENZENBERGS *Versuche über die Umdrehung der Erde*, Dortmund bey Mallinkrodt, 1804, S. 262.
[29] BENZENBERG, S. 268.
[30] Benzenberg, S. 272 bis 290.

befindet. ... Gut gedrehte und polirte Bleykugeln von 1 Zoll Durchmesser waren zu diesen Versuchen bestimmt. ... Der Faden der Kugel wurde durch eine Spalte der kupfernen Platte gezogen und an den Haken befestigt. Die Kugel hing dann zwey Linien unter der Platte. Sobald sie völlig still hing, wurde der Faden oben der Platte abgebrannt. – Die Platte diente zur Verkürzung der Schwingung, sie bestimmte die Lage der Kugeln und hielt den beym Abbrennen etwa entstehenden Luftzug ab.

Die Kugeln sollten unten auf eine Wachsplatte aufschlagen, und GUGLIELMINI hoffte, daß sie dort ziemlich genau an einerley Stelle eintreffen würden.

... Wegen des Fahrens der Wagen zitterte der Thurm, und deßwegen beschloß GUGLIELMINI die Versuche des Nachts anzustellen.

... Um nun die letzte Hand an die Versuche zu legen, ließ GUGLIELMINI das Loth hinunter. Dieses bestand aus einem dünnen Metalldraht, an dessen Ende eine marmorne Kugel von $2^1/_2$ Zoll Durchmesser hing.

... Um nun die Rechnung mit den Versuchen zu vergleichen, so fehlte weiter nichts, als daß die Zeit, welche die Kugeln zu ihrem Fall gebrauchen, sehr genau bestimmt wurde. ... Diese Fallzeit fand GUGLIELMINI sehr nahe $4^1/_5$ Sek. – Die Art, wie sie die Zeit bestimmten, war folgende: Oben im Thurm war ein Sekundenpendel, und unten war eine kleine Maschine angebracht, die ein Licht auslöschte, sobald die Kugel aufschlug. – GUGLIELMINI hatte sich nun durch Uebung die Fertigkeit verschafft, durch Klopfen mit der Hand, die Sekunde in 4, 5 oder 6 Theile einzutheilen.

Die folgende Tabelle stellt das Resultat von Guglielminis Fallversuchen dar. Der Nullpunkt des Koordinatensystems ist die Vertikale, welche mit Hilfe des Lots bestimmt wurde. Die y-Achse zeigt gegen Norden und die x-Achse gegen Osten. Die Koordinaten bedeuten die Distanzen der Aufprallstellen der Kugeln von der Vertikalen[31].

Versuch	x [mm]	y [mm]	Versuch	x [mm]	y [mm]
1	11	- 1	*9*	17	- 11
2	26	- 9	*10*	15	- 12
3	19	- 9	*11*	11	- 9
4	13	- 10	*12*	48	- 21
5	17	- 13	*13*	17	- 12
6	17	- 12	*14*	15	- 12
7	13	- 11	*15*	13	- 10
8	19	- 12	*16*	11	- 14

[31] BENZENBERG, S. 290; dort werden die Abweichungen in "Linien" angegeben. Eine "Linie" ist zwischen 2 und 2.25 mm lang. Für unsere Umrechnung haben wir sie mit 2.1 mm gleichgesetzt.

A 16 Überlegungs- und Übungsaufgabe

Werte Guglielminis Fallversuche nach den Regeln der Experimentierkunst aus.

a) Zeichne die Eindrücke, welche die Kugeln auf der Wachsplatte hinterlassen haben, ins Heft (eine Häuschenbreite soll 2 mm entsprechen).

b) Guglielmini hoffte, dass alle Kugeln am selben Ort auftreffen würden. Nenne zwei Gründe, warum alle Kugeln an verschiedenen Orten angekommen sind.

c) Bestimme die Mittelwerte aller x- und y-Werte. Dabei solltst Du eine der Messungen sehr kritisch behandeln. Benzenberg bemerkt dazu: „Daß man *12* weglässt, ist billig, weil diese große Abweichung vom Winde herrührt“. Mess-Abweichungen, welche auffällig aus der Reihe tanzen, die aber bei jeder Mess-Serie vorkommen können, nennt man Ausreisser.

d) Der Mittelwert der x-Koordinaten (x_m) kann als Ostabweichung der Bleikugeln gedeutet werden. Welches ist die Bedeutung von y_m?

d) Das Resultat von Guglielminis Messung sollte die Form haben

Ostabweichung: …… mm ± ... mm.

Der erste Summand ist natürlich x_m. Jede Messung hat stets nur eine beschränkte Genauigkeit. Der zweite Summand ist die Toleranzgrenze des Messresultates. Wir nennen sie Δx.

Das Resultat der Messung liegt zwischen $x_m - \Delta x$ und $x_m + \Delta x$.

Δx ist der Mittelwert der folgenden Terme

$|x_k - x_m|$, wobei k = 1, 2, ... ,~~12~~, ... , 16,

$|x_k - x_m|$ sind die absoluten Differenzen zwischen den einzelnen Messwerten x_k und dem Mittelwert x_m.

e) Zeichne den Punkt mit den Koordinaten x_m und y_m in Deine erste Zeichnung mit den einzelnen Aufprallpunkten.

Zeichne die Fehler-Toleranzzone um den Punkt (x_m,y_m), nämlich eine (von Hand gezeichnete) Ellipse mit den Halbachsen Δx und Δy.

Ein Experiment, durch welches entschieden werden kann, ob ein physikalischer Sachverhalt zutrifft oder nicht, nennt man *Experimentum crucis.* 1.5 Zentimeter Ostabweichung auf eine Fallhöhe von beinahe 80 m haben über Sein oder Nichtsein der Drehung der Erde entschieden. Guglielminis Experiment wurde selbstverständlich von anderen Physikern wiederholt. Unser Berichterstatter BENZENBERG hat 10 Jahre später Bleikugeln im Turm der Michaelskirche in Hamburg fallen gelassen und die Ostabweichung bestätigt.

6.3. Übereinstimmung von Experiment und Theorie

Ein physikalischer Sachverhalt wird als wahr angenommen, wenn das Resultat eines Experiments mit der Theorie übereinstimmt. Die Theorie der Ostabweichung wurde im Kap. 6.1 *qualitativ* skizziert: Damit wissen wir, *warum* es zu einer Ostabweichung infolge der Erddrehung kommt. Physiker sind aber erst zufrieden, wenn sie auch eine *quantitative* Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment erreicht haben, eine Übereinstimmung der Zahlenwerte.

Um eine vereinfachte Theorie der Ostabweichung zu entwickeln, betrachten wir zunächst einen Turm auf dem Äquator.

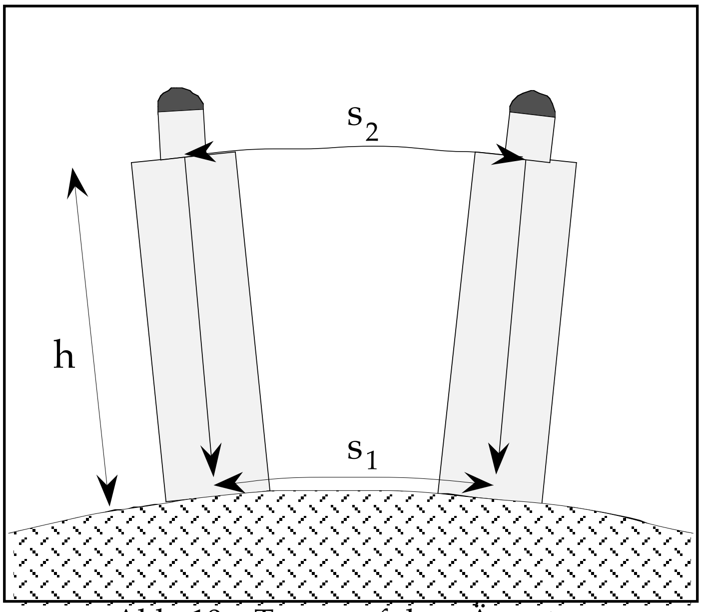

Abb. 10 : Turm auf dem Äquator

Die Abb. 10 zeigt den Turm links im Augenblick, in welchem oben eine Kugel losgelassen wird und rechts im Augenblick, in dem diese Kugel unten ankommt. In der Mitte des Turmes ist jeweils das Lot angedeutet.

Infolge der Drehung der Erde legen der Fuss und die Spitze des Turmes während der Fallzeit der Kugel zwei verschiedene Wege zurück:

- Weg des Turmfusses während der Fallzeit *t:* $s_1 = v_1 \cdot t$
- Weg der Turmspitze während der Fallzeit *t:* $s_2 = v_2 \cdot t$

Die Ostabweichung ist dann $x = s_2 - s_1$.

v_1 und v_2 sind die Geschwindigkeiten, mit denen der Fuss bzw. die Spitze des Turmes gegen Osten eilen. Wenn h die Fallstrecke, R_e der Erdradius und T die Dauer einer Umdrehung der Erde sind, so kann man diese Geschwindigkeiten als «Kreisumfang durch Umlaufszeit» berechnen:

$$v_1 = \frac{2\pi R_e}{T} \quad \text{und} \quad v_2 = \frac{2\pi(R_e + h)}{T}$$

Die Ostabweichung ist also

$$x = v_2 t - v_1 t = \frac{2\pi(R_e + h)t}{T} - \frac{2\pi R_e t}{T} = \frac{2\pi h t}{T}$$

Nun steht der Asinelliturm nicht auf dem Äquator, sondern in Bologna. Die Radien, mit welcher die Spitze und der Fuss eines Turmes, der an einem Ort mit der geographischen Breite β steht, die Erdachse umkreisen, sind auf der folgenden Abbildung ersichtlich:

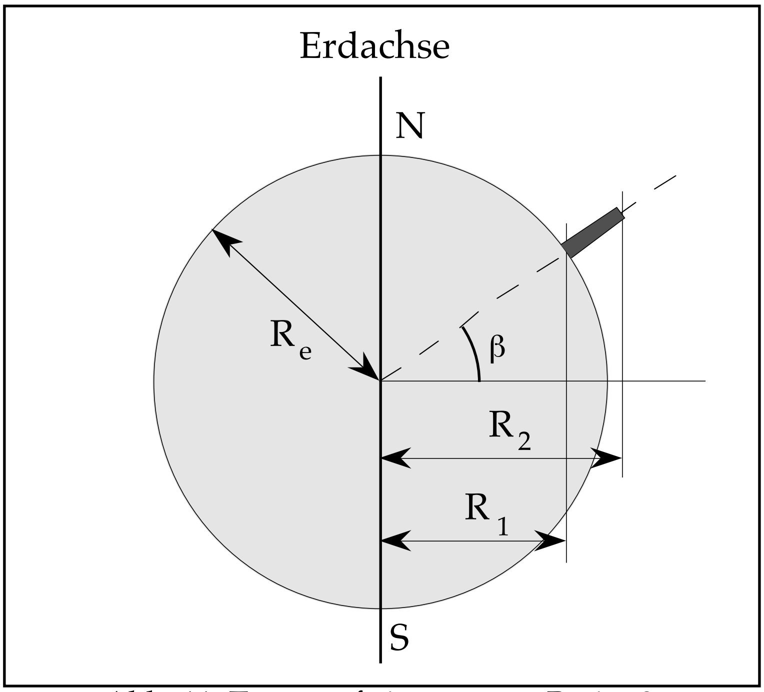

Abb. 11: Turm auf einer geogr. Breite β

A 17 Lernaufgabe zur Ostabweichung in einer geografischen Breite β:

- R_1 ist der Radius, mit dem der Fuss des Turmes die Erdachse umkreist;
- R_2 ist der Radius, mit dem die Turmspitze die Erdachse umkreist.

$$\text{Ostabweichung:} \quad x = \frac{2\pi(R_2 - R_1)t}{T}$$

Nun kann man allerdings weder R_1 noch R_2 messen. Dafür kennt man h und β. Also muss man die obige Formel umformen.

a) Überprüf die Gleichung $\frac{R_2 - R_1}{h} = \frac{R_1}{R_e}$ anhand der Abb. 11.

b) Konstruiere das Verhältnis R_1/R_e:

- Zeichne einen Viertelskreis mit $R_e = 10$ cm
- Trag die geografische Breite $\beta \approx 45°$ bezüglich der Horizontalen ein.
- Miss R_1 und berechne R_1/R_e.

Für Kennerinnen und Kenner der Winkelfunktionen «Sinus» und «Kosinus» berechnet sich die Ostabweichung wie folgt:

$$\cos\beta = \frac{R_1}{R_e} \quad \Rightarrow \quad \boxed{x = \frac{2\pi h t \cos\beta}{T}}$$

c) Berechne die Ostabweichung aus den folgenden Daten:
- Fallhöhe im Asinelliturm: 78 m
- Fallzeit: 4.2 s (aus Dr. Benzenbergs Bericht)
- geografische Breite von Bologna: 44.5° (≈ 45°)

d) Kann Deiner Ansicht nach von einer Übereinstimmung zwischen Guglielminis Messresultat und dem von Dir berechneten Resultat gesprochen werden? Begründe Dein Urteil.

6.4. Effekte können verschiedene Ursachen haben (Exkurs in die Wärmelehre)

Guglieminis Fallversuch zeigt eine Ostabweichung, die mit gutem Gewissen als Effekt der Erddrehung gedeutet werden kann. Er stellte aber auch eine Südabweichung fest, für welche die Drehung der Erde keine Erklärung bietet. Hier handelt es sich offenbar um einen *systematischen Fehler*, d.h. die Südabweichung muss eine Ursache haben, die bei der Planung des Experiments übersehen wurde.

Eine mögliche Ursache für Guglielminis Südabweichung wurde von BENZENBERG angeführt: Er bemerkte nämlich bei seinen Fallversuchen, dass sich der Turm der Michaelskirche in Hamburg jeweils etwas gegen Norden bog, wenn die Sonne schien. Das wäre ein Grund für eine Nordabweichung. Nun hat Guglielmini seine Versuche in der Nacht durchgeführt, und da konnte sich die Spitze des Asinelli-Turmes wieder gegen Süden zurückbiegen. Benzenberg war gewissenhafter als Guglielmini: Er hat die Vertikale jeweils unmittelbar vor und nach den Fallversuchen mit dem Lot bestimmt. Später hat er auch Fallversuche in einem Bergwerksschacht durchgeführt. Eine signifikante Südabweichung wurde weder von ihm noch von anderen Experimentatoren je wieder festgestellt.

Wir wollen nun Benzenbergs *Hypothese*[32] überprüfen. Bekanntlich dehnen sich fast alle Gegenstände bei Erwärmung aus.

Wir machen nun folgendes **Gedankenexperiment:** Man lässt Wasser von verschiedenen Temperaturen durch ein Metallrohr laufen. Dabei misst man jeweils Länge des Rohrs sehr genau (Der Massstab muss natürlich stets dieselbe Temperatur haben). Bei der Temperatur T_o (das muss nicht 0°C sein!) sei die Länge des Rohres L_o. Wenn die Temperatur um ΔT zunimmt, so nimmt die Länge um ΔL zu (man benützt den griechischen Buchstaben „Delta“ (Δ), um Differenzen oder Änderungen zu symbolisieren). Wenn wir nicht allzu grosse Temperatursprünge machen, ist ΔL proportional zu ΔT. Da sich bei der Erwärmung das ganze Rohr streckt, ist ΔL auch proportional zur ursprünglichen Länge. Das Gesetz der thermischen[33] Längenausdehnung lautet also:

$$\boxed{\Delta L \approx \alpha\, L_o\, \Delta T}$$

α ist der Längenausdehnungskoeffizient des Materials.

Material	**α [pro Grad]**
Eisen	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Kupfer	$1.7 \cdot 10^{-5}$
Aluminium	$2.4 \cdot 10^{-5}$
Zink	$2.5 \cdot 10^{-5}$
Ziegelsteine	$1.0 \cdot 10^{-5}$
Beton	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Fensterglas	$0.9 \cdot 10^{-5}$

[32] Eine Hypothese ist eine unbewiesene Annahme eines Sachverhalts oder eines Gesetzes.

[33] „Thermisch“ heisst: die Temperatur betreffend

A 18 Übung zur Längenausdehnung

Um wieviel schwankt die Höhe des Eiffelturmes in einem Jahr, d.h. bei Temperaturschwankungen zwischen –15°C und + 40°C?

Temperaturschwankungen bewirken Variationen der Länge, Breite und Höhe der Gegenstände. Sie sind aber kein Grund für die Neigung eines Turms.

Versuch:

- Erwärme einen Bimetallstreifen[34] mit der Flamme eines Bunsenbrenners.
- Kühle den Streifen mit kaltem Wasser wieder ab.

A 19 (Überlegung)

a) In welche Richtung verbiegt sich ein Bimetallstreifen, bei welchem ein Zinkblech auf ein Eisenblech gelötet wurde, wenn er erwärmt wird?
b) Wenn Baumaterialien verschiedene Ausdehnungskoeffizienten haben, können Temperaturschwankungen zu Bauschäden führen. Nenne zwei Massnahmen, wie solche Schäden vermieden werden können.

A 20 (Überlegung)

Es ist kaum anzunehmen, das die Nord und die Südwand eines Turmes aus verschiedenen Materialien besteht. Welches könnte der Grund der Neigung sein, welche eine Süd- oder Nordabweichung bei Fallversuchen verursacht?

A 21 Lernaufgabe zur Südabweichung (Partnerarbeit):

Um wieviel neigt sich die Spitze des Asinelliturmes, wenn die Südwand um einen bestimmten Betrag wärmer ist als die Nordwand?
Das folgende Modell kann helfen, diese Aufgabe zu lösen: Wenn sich nur die Südwand infolge Erwärmung ausdehnt, verbiegt sich der Turm gegen Norden (siehe Abb. 12):

[34] Bimetallstreifen sind im Lehrmittelhandel erhältlich

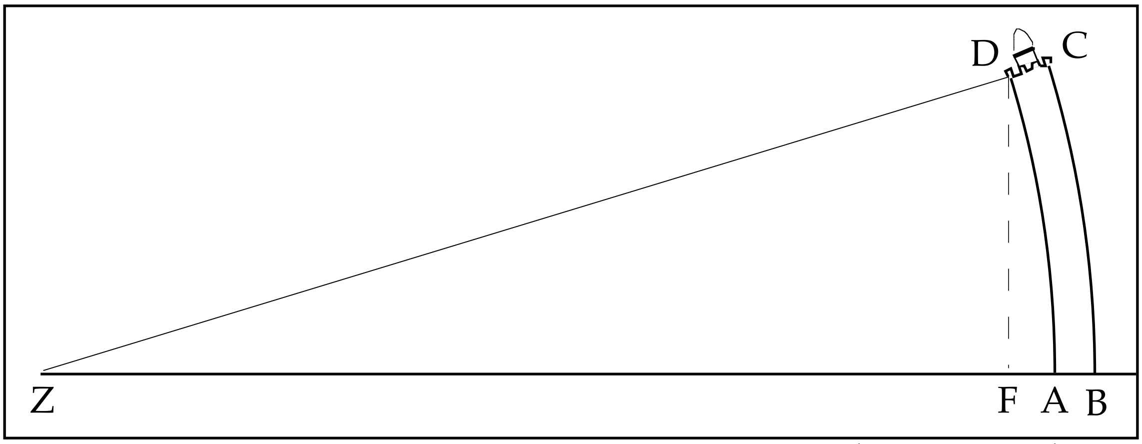

Abb. 12: Die Krümmung des Asinelliturms infolge Bestrahlung von rechts

Daten:
Höhe des Turms: BC = 80 m, Breite des Turms: AB = 8 m, $\Delta T = 5$ Grad.

- Hast Du mit Deiner Rechnung Benzenbergs Hypothese verifiziert oder falsifiziert?

7. Das Foucaultsche Pendel

7.1. Die Bewegung eines Pendels

Die Fallversuche zum Nachweis der Erddrehung haben einen entschiedenen Nachteil: Frei fallende Körper haben zuwenig Zeit, um deutlich sichtbar gegen Osten abgelenkt zu werden. Man müsste die Fallbewegung drastisch verlangsamen – oder sogar periodisch wiederholen. Zum Glück gibt es eine Bewegung, welche beide Forderungen erfüllt: Das Hin- und Herschwingen eines Pendels.

Die Pendelbewegung ist ein von einem Faden geführter Fall. Galileis Fallversuche haben ergeben, dass die Fallzeit nicht von der Masse eines frei fallenden Körpers abhängt. Ebenso hängt die Schwingungsdauer (die Periode) eines Pendels auch nicht von der Masse des hin- und her schwingenden Körpers ab. Sie ist auch (beinahe) unabhängig von der Schwingungsweite. Der holländische Physiker CHRISTIAN HUYGENS, ein Zeitgenosse Newtons und der Begründer der Wellentheorie des Lichts, hat eine Formel für die Periode des Fadenpendels gefunden, die umso besser gültig ist, je kleiner die Schwingungsweite ist:

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}}$$

Dabei sind

T = Periode der Schwingung eines Fadenpendels, d.h. die Zeit eines vollständigen Hin- und Herganges;
L = wirksame Länge des Pendels, d.h. Abstand vom Aufhängepunkt bis zum Schwerpunkt des Pendelkörpers;
g = Schwerewert der Erde.

Der Schwerewert der Erde ist ein Mass für den „Sog“ der Erde, Körper an sich zu ziehen. Der Schwerewert sollte nicht mit der *Schwerkraft* verwechselt werden. Diese ist bekanntlich umso grösser ist, je grösser die Masse des von der Erde angezogenen Körpers ist. Die Schwerkraft ist also das Produkt aus dem Schwerewert und der Masse des Körpers, also $m \cdot g$.

Der Schwerewert ist identisch mit der Fallbeschleunigung, d.h. g ist ein Mass, um wieviel frei fallende Körper pro Zeiteinheit schneller werden.

Versuch: Fadenpendel (Schülerversuch)
Material

- Ein Pendelkörper (schwerer Stein oder Metallkugel mit Haken)
- starker Faden
- Wenn keine Aufhängevorrichtung an der Decke zur Verfügung steht: Stativmaterial
- Stoppuhr und Rollmeter

- Baue ein Pendel, dessen Faden wenn möglich fast so lang ist wie die Höhe des zur Verfügung stehenden Zimmers.
- Miss die wirksame Länge des Pendels, d.h. die Länge vom Aufhängeknoten bis zum Zentrum des Pendelkörpers.
- Miss die Periode des Pendels:
  Lenk es schwach aus und fühle Dich sich zunächst in seinen Rhythmus ein. Stopp dann die Zeit für 10 Schwingungen (Vorsicht beim Zählen: Die Stoppuhr bei „Null“ starten und nicht bei „Eins“). Dabei sollte die Amplitude (d.h. die maximale Schwingungsweite) möglichst klein sein.
- Nebenbei kannst Du mit verschiedenen Pendelkörpern überprüfen, welchen Einfluss die schwingende Masse auf die Periode der Schwingung hat.
- Überprüf auch die schwache Zunahme der Schwingungsdauer mit zunehmender Amplitude.
- Verändere nun die Fadenlänge und überprüfe die Proportionalität zwischen der Periode und der Wurzel der Länge.
- Konstruktion eines Sekundenpendel. Dem „Tic-Tac“ der alten Pendeluhren entsprechend hat ein Sekundenpendel eine Periode von *zwei* Sekunden. Berechne die Länge des Sekundenpendels mit der Formel von Huygens. Bau es und prüf es mit einer Stoppuhr nach.

A 22 Übung und Kontrolle
Bestimme den Schwerewert der Erde mit Hilfe edes Pendel-Experiments.

7.2. Die Experimente von FOUCAULT

1851 veröffentlichte LÉON FOUCAULT einen Artikel, der so bedeutend war, dass er sogleich aus dem Französischen ins Deutsche übersetzt wurde und in der damals führenden deutschsprachigen Fachzeitschrift, den *Annalen der Physik und Chemie,* unter dem Titel „Physikalischer Beweis von der Axendrehung der Erde mittelst des Pendels“[35] erschienen ist:

> Die bisherigen so zahlreichen als wichtigen Pendelbeobachtungen hatten besonders die Dauer der Schwingungen zum Gegenstand; diejenige, welche ich heute der Akademie vorzulegen gedenke, betreffen hauptsächlich die Richtung der Schwingungsebene, welche, indem sie

[35] Annalen der Physik und Chemie, Bd. 82, S.458-462, Leipzig, 1851

sich langsam von Osten nach Westen dreht, eine sichtbare Anzeige von der täglichen Bewegung des Erdkörpers liefert.

... Ich nehme an, der Beobachter befinde sich auf dem Pol und habe daselbst ein Pendel von größter Einfachheit, d.h. ein Pendel bestehend aus einer schweren homogenen Kugel, die mittelst eines biegsamen Fadens an einem absolut festen Punkte hängt. Ebenso setze ich zuvörderst voraus, daß dieser Aufhängepunkt genau in der Verlängerung der Erdaxe liege .... Wenn man unter diesen Umständen das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage ablenkt und es, ohne ihm einen Seitenstoß mitzutheilen, der Wirkung der Schwerkraft überläßt, so wird sein Schwerpunkt in die Verticale zurückkehren, und sich, vermöge der erlangten Geschwindigkeit, an der anderen Seite der Verticale fast bis zu derselben Höhe erheben, von der er ausgegangen ist. Dort angelangt erlischt seine Geschwindigkeit, wechselt das Zeichen und führt ihn abermals durch die Verticale, bis etwas unter seinen Ausgangspunkt. Somit schwingt die Masse in einem Kreisbogen, dessen Ebene wohl bestimmt ist und vermöge der Trägheit der Materie eine unveränderte Lage im Raume bewahrt.

Wenn also diese Schwingungen eine gewisse Zeit hindurch andauern, so wird die Bewegung der Erde, die sich unaufhörlich von Westen nach Osten dreht, sichtbar durch den Contrast mit der Unbeweglichkeit der Schwingungsebene, deren Projection auf den Boden eine übereinstimmende Bewegung mit der scheinbaren der Himmelskugel zu besitzen scheint; und wenn die Schwingungen sich 24 Stunden lang fortsetzen, wird die Projection ihrer Ebene in derselben Zeit eine volle Drehung um die Verticalprojection des Aufhängepunktes ausführen.

... Unter unseren Breiten complicirt sich aber die Erscheinung durch ein etwas schwer zu beurtheilendes Element, auf welches ich lebhaft die Aufmerksamkeit der Mathematiker hinzulenken wünsche.

In dem Maaße nämlich als man sich dem Aequator nähert, nimmt die Horizontalebene eine immer schiefere Lage gegen die Erdaxe an, und die Verticale, statt wie an dem Pole sich um sich selbst zu drehen, beschreibt einen stets offeneren Kegel. Daraus entspringt eine Verzögerung in der scheinbaren Bewegung der Schwingungsebene, einer Bewegung, die sich unter dem Aequator annuliert, und in der andern Hemisphäre die Richtung umkehrt. ... Ich muss mich [in dieser Notiz] mit der Angabe begnügen, daß die Winkelbewegung der Schwingungsebene gleich ist der Winkelbewegung der Erde in derselben Zeit, multiplicirt mit dem Sinus der geogr. Breite. Ich habe mich also vertrauensvoll ans Werk begeben und folgendermaßen operirt. Ich habe die Wirklichkeit des vorausgesehenen Phänomens sowohl seiner Richtung, als seiner wahrscheinlichen Grösse nach festgestellt.

In den Scheitelpunkt eines Kellergewölbes wurde ein starkes gusseisernes Stück eingelassen und dieses lieferte den Tragpunkt für den Aufhängefaden, der hervortrat mitten aus einer kleinen gehärteten Stahlmasse, deren freie Oberfläche vollkommen horizontal war. Dieser Faden bestand aus einem im Drahtzug stark gehärteten Stahldraht von 0,6 bis 1,1 Millimeter im Durchmesser. Er hatte eine Länge von 2 Metern und trug am unteren Ende eine abgedrehte und polirte Messingkugel, die

> überdiess so gehämmert war, daß ihr Schwerpunkt mit ihrem Mittelpunkt zusammenfiel. Diese Kugel wog 5 Kilogrm., und sie besaß eine spitze Verlängerung, welche die Fortsetzung des Aufhängefadens zu bilden schien.
>
> Man beginnt den Versuch damit, daß man die Torsion des Drahtes und die drehenden Schwingungen der Kugel vernichtet. Um sie aus der Gleichgewichtslage abzulenken schlingt man einen organischen Faden herum, dessen anderes Ende an einem festen Punkt in der Mauer, in geringer Höhe über dem Boden, geknüpft ist. Durch die Länge, die man diesem Faden giebt, kann man die Ablenkung und die Größe der Schwingung nach Belieben einrichten. Gewöhnlich betrug bei meinen Versuchen der Schwingungsbogen anfangs 15 bis 20 Grad. ... Sobald man es [das Pendel] vollständig beruhigt hat, brennt man den Faden an irgend einem Punkte seiner Länge durch; er reißt, die um die Kugel gelegte Schleife fällt zu Boden, und das Pendel, alleinig von der Schwerkraft getrieben, setzt sich in Gang und macht eine lange Reihe von Schwingungen, deren Ebene sich bald merklich verschiebt. Nach Verlauf einer halben Stunde ist die Verschiebung bereits so groß, daß sie in die Augen springt. ...
>
> Der Güte des Hrn. Arago und dem intelligenten Eifer unseres geschickten Künstlers Hrn. Froment, der mich bei Ausführung dieser Arbeit thätig unterstützt hat, verdanke ich es, daß ich den Versuch schon in grösserem Maaßstabe wiederholen konnte. Die Höhe des Meridiansaales der Sternwarte benutzend, konnte ich dem Faden des Pendels eine Länge von 11 Meter geben. Die Schwingung war zugleich langsamer und grösser, so daß schon nach zweimaliger Rückkehr des Pendels eine merkliche Abweichung nach der Linken hin deutlich ward. ...

Auf ausdrücklichen Wunsch von Louis Napoléon wiederholte Foucault seinen Versuch 1851 im Panthéon in Paris. Eine Messingkugel von 28 kg hing an einem Stahldraht von 1.4 mm Dicke und einer Länge von 67 m. Auf dem Holzschnitt auf dem Titelblatt ist zu sehen, dass die Drehung der Schwingungsebene mit einem Wall aus Sand registriert wurde, der an der Peripherie aufgebaut war. Bei jeder Rückkehr des Pendels stiess die Spitze unter der Kugel ein bisschen Sand vom Wall, so dass die Drehung der Schwingungsebene an der wachsenden Bresche sichtbar wurde.

A 23 Übungsaufgabe zum Foucaltschen Pendel

a) Berechne die Schwingungsdauer des grossen Foucault-Pendels.

b) Mit Hilfe von Foucaults Text kannst Du berechnen, um wieviele Millimeter die Pendelspitze bei jeder Schwingung verschoben wurde. Dabei nehmen wir an, dass Sandwall, auf dem die Drehung registriert wird, 3m von der Gleichgewichtslage entfernt gewesen sei.

7.3. Die Theorie des Foucaultschen Pendels

Für einen ersten Theorie-Ansatz soll das Pendel
a) auf dem Nordpol,
b) auf dem Äquator stehen (s. Abb. 13):

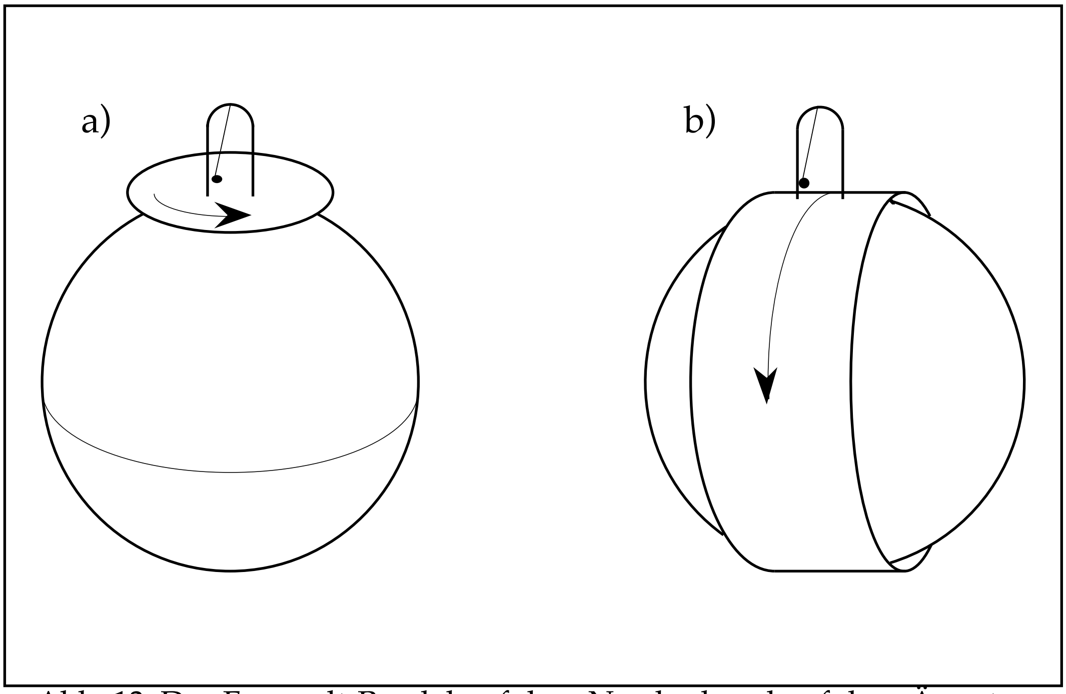

Abb. 13: Das Foucault-Pendel auf dem Nordpol und auf dem Äquator

Versuch:

- Stell ein kleines Pendel auf eine Drehscheibe, wie man sie etwa zum Modellieren von Tonfiguren braucht (wie auf Abb. 13a, allerdings ohne „Erdkugel" darunter, dafür mit einem guten Kugellager).
- Bring das Pendel zum Schwingen. Lass die Drehscheibe langsam rotieren. Beobachte dabei genau, in welche Richtung das Pendel schwingt.

Ein Beobachter, der auf der rotierenden Scheibe steht, würde sagen: „Die Schwingungsebene des Pendels dreht sich, und zwar genau so wie meine Umgebung ausserhalb der Scheibe". Auf dem Nordpol wären dann die Sterne die Umgebung des Beobachters.

Auf der Abb. 13 b) sieht man, wie sich der „Äquatorteppich" um die Erdachse wälzt. Das Pendel, das auf diesem „Teppich" steht, wird zwar gekippt, aber seine Schwingungsrichtung ändert sich nicht. Am Äquator kann man es einem schwingenden Pendel also nicht ansehen, dass die Erde sich dreht. Die Dauer einer Umdrehung der Schwingungsrichtung wäre dann „unendlich" gross.

A 24 Überlegung zum Text von Foucault

Diese Aufgabe setzt die Definition der *Sinus*-Funktion voraus.
Léon Foucault hat „den Mathematikern" eine Aufgabe gestellt: Er sprach von einem „etwas schwer zu beurtheilenden Element, auf welches ich lebhaft die

Aufmerksamkeit der Mathematiker hinzulenken wünsche“. Wir versuchen die Formel für die Dauer eines ganzen Umlaufs der Schwingungsebene an einem Ort der geografischen Breite β herleiten. Damit wir die Drehdauer der Schwingungsebene nicht mit der Schwingungsdauer des Pendels verwechseln, bezeichnen wir jene mit dem griechischen Buchstaben *Tau* (τ).

a) Die in Abb. 13 skizzierten Sachverhalte können in der Sprache der Mathematik wie folgt zusammengefasst werden:

- Nordpol: $\beta = 90°$ ⇒ $\sin 90° = 1$ ⇒ $\tau = \tau_o = 23$ h 56 min
- Äquator: $\beta = 0$ ⇒ $\sin 0° = 0$ ⇒ $\tau = \infty$

Kann damit die die folgende Formel plausibel begründet werden?

$$\boxed{\tau = \frac{\tau_o}{\sin\beta}}$$

b) In Foucaults Text seht nicht „getailet durch den Sinus“, sondern: „ … *multiplicirt* mit dem Sinus der geogr. Breite“. Kläre diesen scheinbaren Widerspruch.

Es ist nicht einfach, anschaulich herauszufinden, in welcher Zeit sich die Schwingungsebene eines Pendels dreht, das weder auf einem Pol noch auf dem Äquator steht, sondern an einem beliebigen Ort auf der Erdkugel. Die folgende Modell soll ein Versuch dafür sein:

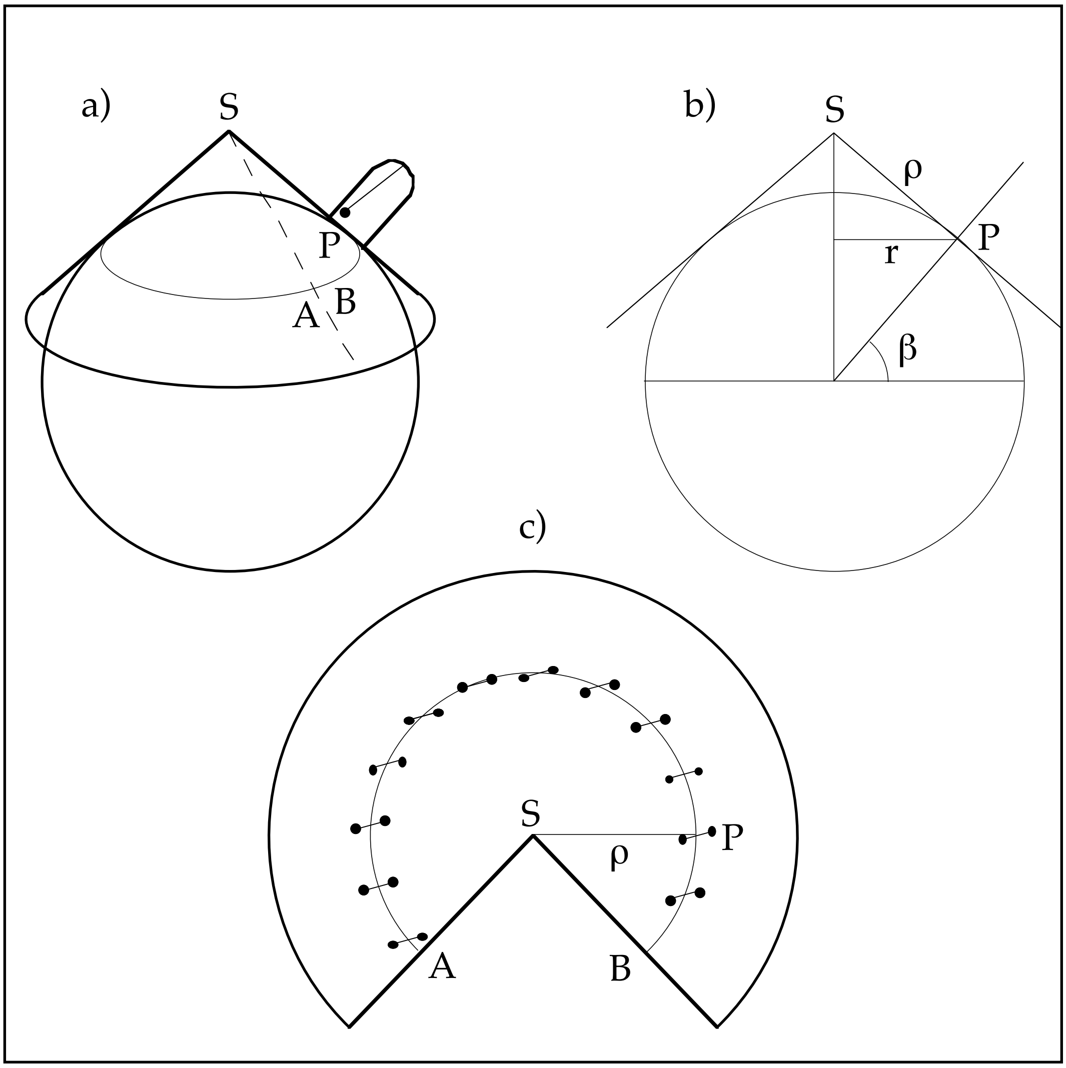

Abb. 14: Foucault-Pendel auf einer geog. Breite β

Auf der Abb. 14a ist ein Kegel so über die Erde gestülpt, dass sein Mantel die Erdoberfläche auf einem Breitenkreis berührt. Bei der Drehung der Erde nimmt dieser Kegel sowohl an der Drehung der Polscheibe wie auch am Sich-Wälzen des „Äquatorteppichs“ teil.

Wenn sich die Erde einmal dreht, so dreht sich der Kegel z.B. von A nach B. Dabei bewegt sich das Pendel am Ort P längs eines Weges der Länge $2\pi r$, wenn r der Radius des Breitenkreises ist (Abb. 14 b). Um wieviel dreht sich dann die Schwingungsebene des Pendels?

Damit wir die Drehung des Kegels in eine ebene Drehung des Kegelmantels umwandeln können, müssen wir den Kegel längs einer Mantellinie aufschneiden und glätten (Abb. 14 c). Dann erst sieht man, dass der Boden des Pendels am Ort P während 23 h 56 min keine volle Umdrehung macht. Er dreht sich nur von A nach B. Auf dem geglätteten Breitenkreis mit dem Radius ρ ist die Schwingungsrichtung des Pendels im Zeitintervall von je zwei Stunden eingezeichnet.

Wir bezeichnen die Zeit, in welcher der Ort P auf dem geglätteten Kegelmantel eine volle Umdrehung macht, mit dem griechischen Buchstaben τ (Tau): Während der Zeit τ legt P den Weg $2\pi\rho$ zurück.

$$\Rightarrow \quad \frac{\tau}{\tau_o} = \frac{2\pi\rho}{2\pi r} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\tau}{\tau_o} = \frac{\rho}{r}}\ , \text{ wenn } \tau_o = 23\text{ h } 56\text{ min ist.}$$

A 25 Berechnung der Drehung des Foucaultpendels

Berechne den Winkel φ, um welchen sich das Foucault-Pendel während einer Stunde dreht, wenn es auf einen beliebigen Ort der Erde steht.

a) Anleitung ohne „Sinus“:

- Zeichne einen Viertelkreis mit R = 10 cm wie der erste Quadrant der Abb. 14 b. Zeichne die vertikale Drehachse der Erde ein.
- Trag die geographische Breite β ein und den Schnittpunkt P des Winkel-Schenkels mit dem Kreis. Der Punkt P entspricht dem Ort, wo das Pendel steht.
- Zeichne eine Tangente in P, welche die Rotationsachse der Erde schneidet.
- Miss die Längen von r und ρ (Abb. 14 b).
- Mit $\frac{\tau}{\tau_o} = \frac{\rho}{r}$ und $\frac{\varphi}{360°} = \frac{1\text{h}}{\tau}$ kannst Du φ ausrechnen.

b) Anleitung mit Verwendung der „Sinus“-Funktion:

$$\sin\beta = \frac{r}{\rho} \quad \text{(siehe Abb. 14 b)} \Rightarrow \quad \tau = \frac{\tau_o}{\sin\beta} \quad \Rightarrow \quad \varphi = \frac{360°}{23\text{h}\,56\text{min}}\sin\beta$$

A 26 Überlegung und Textaufgabe zu den Beweisen der Erddrehung

Schreib in einem kurzen Text Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Fallversuchen von Guglielmini, Benzenberg usw. und dem Foucaultschen Pendelversuch auf.

8. Trägheitskräfte

8.1. Die Zentrifugalkraft

A 27 Überlegung zum Thema „Erdsatellit“

In einer Diskussion unter Studenten über die Drehung der Erde[36] meinte ein Teilnehmer: „Wenn sich die Erde immer schneller drehen würde, so würden wir (und alle Gegenstände mit uns) schliesslich abheben“.

a) Welche Überlegung könnte dieser Behauptung zugrunde liegen?

b) In welchen Zonen der Erde würde man zuerst „den Boden unter den Füssen verlieren“?

c) In welche Richtung würde man nach dem Abheben wegfliegen?

d) Kannst Du Dir nach dieser Überlegung vorstellen, wie sich ein Erdsatellit bewegt? Seine Geschwindigkeit hat er allerdings nicht durch ein immer schnelleres Rotieren der Erde erworben, sondern mittels einer Rakete.

A 28 Überlegung zur Lotabweichung

Zum Glück dreht sich die Erde nicht so schnell, dass die Bewohner der äquatorialen Zonen weggeschleudert werden. Die Erddrehung hat weit

[36] MARTIN WAGENSCHEIN: Naturphänomene sehen und verstehen, Klett, Stuttgart 1980, S. 173.

feinere Wirkungen: Beispielsweise zeigt das Lot in der Regel nicht ganz genau zum Mittelpunkt der Erde.
a) Es gibt aber Orte auf der Erde, an denen das Lot genau zum Erdmittelpunkt zeigt. Wo müssen diese Orte liegen?
b) In welche Himmelsrichtung weicht das Lot an einem Ort ab, der auf einer mittleren Breite der Nordhalbkugel liegt?

Bei den obigen Überlegungsaufgaben scheint es um die Wirkung der *Zentrifugalkraft* zu gehen. Dieser geheimnisvollen Fliehkraft wollte eine Gymnasialklasse auf die Spur kommen[37]:

Szene:
Eine schwere Stahlkugel hängt an einer langen, starken Schnur, die an der Decke befestigt ist. Der Lehrer lenkt die Kugel aus und gibt ihr einen Stoss senkrecht zur Auslenkung. Die Kugel beschreibt dann über den Köpfen der Schülerinnen und Schüler einen schönen Kreis. Weil die Schnur dann den Mantel eines Kreiskegels in die Luft zeichnet, nennt man das Pendel in dieser Spielart des „Kegelpendel" oder „konisches Pendel"[38] .

LEHRER: Wer kann sagen, welche Kräfte hier im Spiel sind?
JOELLE: Am Anfang ist es die Zentrifugalkraft. Gegen den Schluss wird es nach innen gezogen.
DANIEL *(skeptisch):* So halb-halb.
Die Schülerinnen und Schüler sehen Daniel fragend an:
DANIEL: Halb Zentrifugalkraft, halb Gewichtskraft.
DALIA: Ich kann mit dem Wort «Zentrifugalkraft» nichts anfangen.
ANDREAS: Die Kugel kreist um ein Zentrum, das nicht existiert – also: das Zentrum ist höher, beim Haken oben.
JOELLE: Es existiert schon, man sieht es nur nicht.
CYRIL: Die Kugel rotiert um eine vertikale Achse, die man sich vorstellen muss. Sie wird von der Erde angezogen.
FLORENCE: Sie rotiert weiter von der Erde entfernt, als wenn sie stillstünde, also muss sie gezwungenermassen zum Mittelpunkt kommen.
LEHRER: Du meinst wegen der Erdanziehung?
FLORENCE: Ja – aber wahrscheinlich ist das falsch.
LEHRER: Die Ursache der Bremsung und des Hinstrebens zu tiefsten Punkt ist doch hauptsächlich der Luftwiderstand. Könnte man sich denken, dass die Kugel im luftleeren Raum ständig rotieren würde – etwa wie der Mond oder ein Erdsatellit?
MATTHIAS: Sie würde auch im luftleeren Raum zur Mitte kommen. Beim Satelliten ist die Anziehungskraft immer in der Mitte der Bahn. Das Pendel dagegen wird nach unten gezogen.
LEHRER: Wer oder was zieht denn alles an der Kugel?
JOELLE: Die Zentrifugalkraft und die Anziehungskraft.
LEHRER: Stellt euch vor, ihr würdet in der Turnhalle an den Ringen so kreisen wie die Kugel. Was zieht dann alles an euch?

---

[37] Das Unterrichtsgespräch wurde von zwei Schülerinnen genau protokolliert. Dadurch litt natürlich der Gesprächsfluss. Andererseits waren die Wartezeiten Gelegenheiten zum Nachdenken.
[38] Lat: *conus:* Kegel, Helmspitze.

ANNA: Das eigene Gewicht...
DALIA: ... und die Erdanziehungskraft.
LEHRER: Ist das nicht dasselbe?
DALIA *(leise):* Doch!
CYRIL: Auch die Schnur zieht. Die Schnur zieht mit gleicher Kraft wie die Kugel mit ihrem eigenen Gewicht nach unten zieht.
LEHRER: Zieht die Schnur immer gleich stark? *(Er bremst die Kugel, die immer noch ein bisschen Schwung hat und lässt sie dann ein paar Runden mit ganz kleiner Auslenkung um die Lotlage rotieren. Dann lenkt er sie weit aus und gibt ihr einen kräftigen Stoss, so dass sie bedrohlich hoch über den Köpfen kreist.)*
CYRIL: Beim grossen Kreis muss die Schnur viel mehr ziehen. Die Schnur hat dafür zu sorgen, dass die Kugel in gleicher Höhe bleibt.
LEHRER *zeichnet ein Pendel an die Wandtafel. Zuerst wird die Gewichtskraft als Pfeil von der Kugel zur Erde eingezeichnet, was keinen Widerspruch erregt. Dann – auch ohne Probleme – die Schnurkraft.*

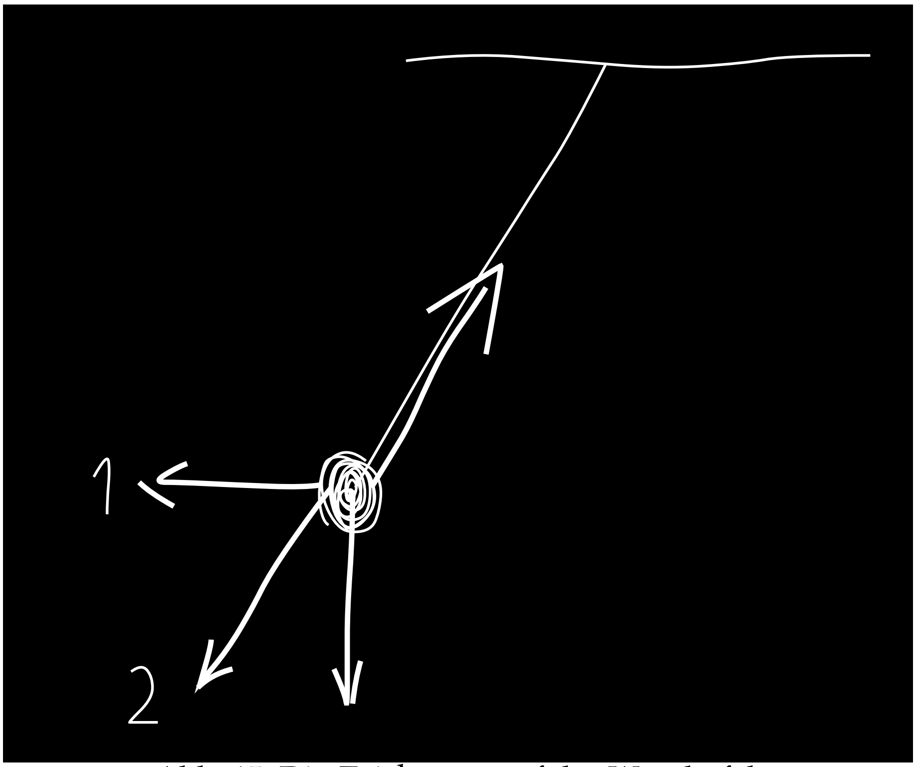

Abb. 15: Die Zeichnung auf der Wandtafel

ANDREAS *(leicht vorwurfsvoll):* Die Zentrifugalkraft ist gar nicht mitgerechnet! *(Die Kraft „1“ wird eingezeichnet)*
SERGIO: Ich würde sie in entgegengesetzter Richtung zur Schnurkraft zeichnen. *(Die Kraft „2“ wird eingezeichnet)*
allgemeine Ratlosigkeit
LEHRER: Betrachten wir die Kräfte einmal vom sprachlichen Gesichtspunkt: Alles, was wir sagen, sagen wir in Sätzen. Ein einfacher Satz besteht doch aus einem Prädikat, einem Subjekt und einem Objekt. Probieren wir einmal solche Sätze für unsere Kräfte zu bilden.
Die Schülerinnen und Schüler machen mürrische Gesichter, weil sich ein Physiklehrer erdreistet, in seiner Stunde über Grammatik zu sprechen!

Immerhin werden die folgenden Sätze gebildet:
- Schwerkraft: Die Erde zieht die Kugel an.
- Schnurkraft: Die Schnur zieht die Kugel schief nach oben.

LEHRER: Wer oder was ist das Subjekt bei der Zentrifugalkraft? Wer oder was zieht oder drückt die Kugel nach aussen?
SERGIO *(bestimmt):* Die Kugel zieht sich selber nach aussen.
LEHRER: Wie der Baron von Münchhausen?
ANDREAS: Die Zentrifugalkraft ist die Reaktion[39] auf die beiden Kräfte.
LEHRER: Das ist Newtonsche Magie.
DALIA: Es hat etwas mit der Geschwindigkeit zu tun.
LEHRER: Sicher, aber wir können Geschwindigkeiten nicht gegen Kräfte in Rechnung setzen – ich meine: mit Kräften vergleichen.
DALIA: Der Anfangsstoss! Der bestimmt alles!
LEHRER: Ja! – – – Aber was ist mit der Zentrifugalkraft?
wieder allgemeine Ratlosigkeit!
LEHRER: Nehmen wir einmal an, dass der Faden plötzlich reissen würde. Was würde die Kugel dann machen? – Welche Kräfte wären dann noch wirksam?
CYRIL: Die Schnurkraft fällt dann weg.
LEHRER: Welches wäre dann die Bahn der Kugel von oben und von der Seite gesehen?
SANDRA: Sie würde geradeaus zur Wand fliegen – tangential.
ANDREAS: Und von der Seite wäre es ein Wurf – eine Parabel.
LEHRER: Nehmen wir weiter an: In dem Augenblick, wo die Schnur reisst, schaltet ein Dämon die Erdanziehung aus.
ANNA *(begeistert):* Dann würde die Kugel geradeaus fliegen – wie im All!
LEHRER: Die Erde und die Schnur halten die Kugel also davon ab, dieser Tangente zu folgen. Die Erde und die Kugel zwingen die Kugel also auf ihre Kreisbahn. – – – Und was ist nun mit der Zentrifugalkraft?
SCHULHAUS: Dingdong dingdong!

Leider kam die Klasse an diesem Morgen nach dem Schülerfest zu keinem Schluss, was es mit der Zentrifugalkraft auf sich hat. Einige Schülerinnen und Schüler begannen sogar zu zweifeln, ob sie überhaupt existiert.

---

[39] Hier spielt der Schüler auf das ihm bereits bekannte dritte Grundgesetz von Newton an (Actio = Reactio).

Versuch: Wasserpendel

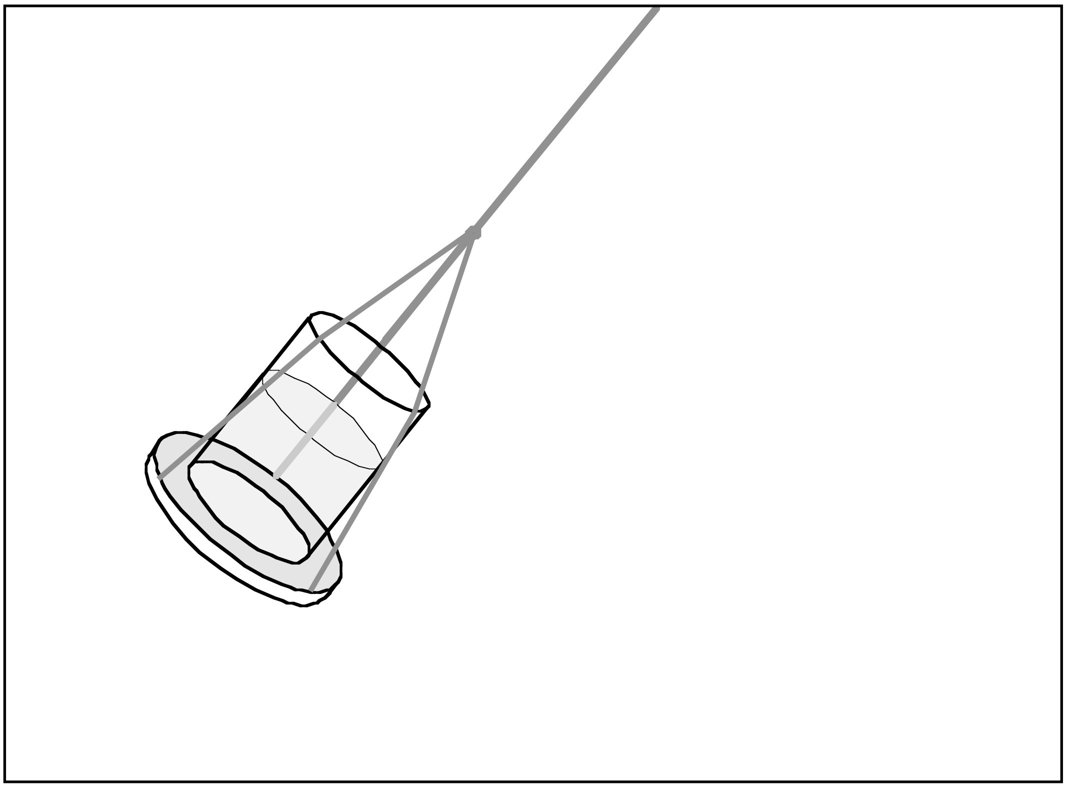

Abb. 16: Das Wasserpendel

- Fülle ein Glas, das an einer starken Schnur hängt, mit Wasser.
- Lass dieses Glas hin- und her schwingen wie ein Weihrauchgefäss. Beobachte dabei den Wasserspiegel.
- Versuch dann das Gefäss oben herum zu schleudern, ohne dass ein Tropfen Wasser ausläuft.
- Lass das Pendel schliesslich einen horizontalen Kreis beschreiben (Kegelpendel).

A 29 Überlegung zu Grundbegriffen wie „oben-unten“ „horizontal“ usw.
Stell Dir eine kleine Puppe anstelle des Wassers im rotierenden Gefäss vor. Was ist in der kleinen Welt im Glas „oben und unten“? Und was ist dort „horizontal“?

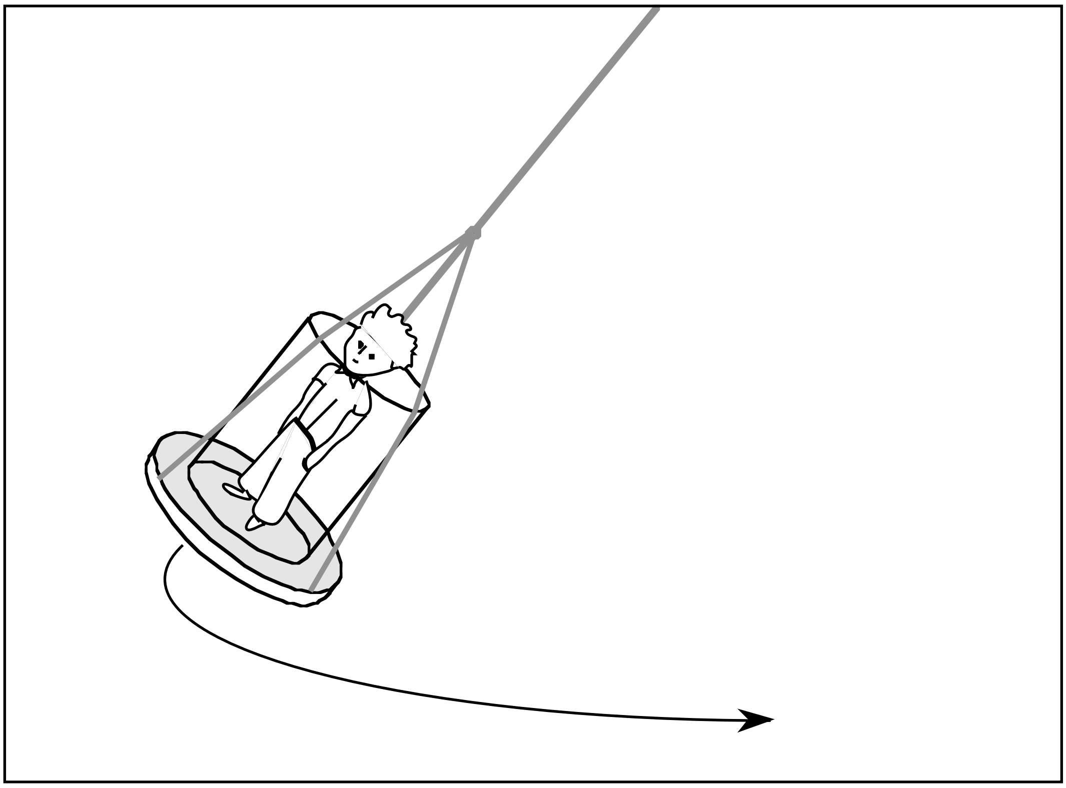

Abb. 17 : Die „Welt“ im Kegelpendel

Ein Bewohner dieser kleinen Welt könnte mit Recht sagen: „Ich stehe lotrecht. Alles ist in Ruhe, aber die Welt um mich ist schief und rotiert um mich“. Diese Deutung der Welt ist im Prinzip dieselbe wie die eines Sternguckers, der auf auf der Erde steht: Er sieht, wie das Firmament mit den Sternen um den Himmelspol kreist, der schief über ihm steht.

Wenn wir das Kegelpendel mit der Puppe von aussen beobachten, deuten wir die Sache anders, objektiver, wie wir meinen: Damit die Puppe nicht umfällt, muss sie sich nach innen neigen wie ein Radfahrer. Oder ein Kassierer auf dem Rand eines Karussells.

In seinem Hauptwerk, den „Mathematischen Prinzipien der Naturlehre“[40] beschreibt ISAAC NEWTON einen einfachen Versuch zum Thema „Zentrifugalkraft“, wobei er dieses Wort tunlichst vermeidet:

> Man hänge z.B. ein Gefäss an einem sehr langen Faden auf, drehe dasselbe beständig im Kreise herum, bis der Faden durch die Drehung sehr steif wird; hierauf fülle man es mit Wasser und halte es zugleich mit dem letzteren in Ruhe. Wird es nun durch eine plötzlich wirkende Kraft in entgegengesetzte Kreisbewegung versetzt und hält diese, während der Faden sich ablöst, längere Zeit an, so wird die Oberfläche des Wassers anfangs eben sein, wie vor der Bewegung des Gefässes, hierauf, wenn die Kraft allmählich auf das Wasser einwirkt, bewirkt das Gefäss, dass dieses

[40] ISAAC NEWTON: *Mathematische Prinzipien der Naturlehre,* Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1963, S.29.

(das Wasser) merklich sich umzudrehen anfängt. Es entfernt sich nach und nach von der Mitte und steigt an den Wänden des Gefässes in die Höhe, indem es eine hohle Form annimmt. (Diesen Versuch habe ich selbst gemacht). Durch eine immer stärkere Bewegung steigt es mehr und mehr an, bis es in gleichen Zeiträumen mit dem Gefäss sich umdreht und relativ in demselben ruhet."

Newtons Eimerversuch

- Der Versuch lässt sich bequem mit einer Schwungmaschine durchführen, auf deren vertikaler Achse ein Wasserglas befestigt wird.

Im folgenden wollen wir untersuchen, welche Kräfte auf die rotierende Kugel eines Kegelpendels wirken. Diese Art der Kräfteanalyse können wir dann auch auf andere Probleme übertragen.

- Welche Kräfte wirken auf einen Radfahrer, ein Flugzeug usw, in einer Kurve?
- Newtonscher Eimerversuch: Welche Kräfte wirken auf ein kleines Schiffchen, das auf dem Wasser schwimmt, wenn der Eimer sich dreht?

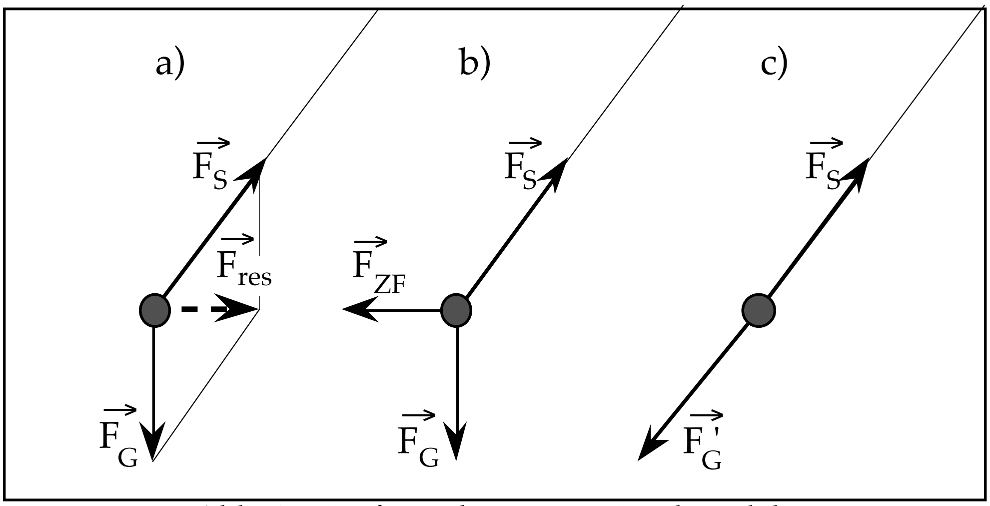

Abb. 18: Kräfteanalyse eines Kegelpendels

Eine Kraft wirkt stets ein eine bestimmte Richtung. Deshalb werden Kräfte durch Pfeile symbolisiert, die man *Kraftvektoren* nennt. Die Länge des Pfeils gibt an, wie stark etwas drückt oder zieht. Die Pfeil-Länge ist ein Mass für den *Betrag* der Kraft.

Die Frage nach Kräften lautet stets: Wer oder was zieht, drückt, ... am Körper, der mich interessiert?

Für eine Kräfteanalyse kommt es drauf an, von welchem Bezugssystem aus das Problem analysiert wird:

a: In Abb. 18 a) betrachten wir das Kegelpendel von aussen. Dabei stellen wir zunächst zwei Kräfte fest, welche auf die Kugel wirken:

- Die Erde zieht die Kugel lotrecht nach unten:

  ⇒ Gewichtskraft oder Schwerkraft $\vec{F}_G$

Die Gewichtskraft ist ein Produkt aus zwei Faktoren: $\vec{F}_G = m\vec{g}$

m ist dabei die Masse des Körpers, der von der Erde angezogen wird

$\vec{g}$ ist der Schwerewert der Erde (siehe Kap. 7.1)

- Die Schnur zieht die Kugel schief nach oben: ⇒ Schnurkraft $\vec{F}_S$

Die beiden Kraftvektoren $\vec{F}_G$ und $\vec{F}_S$ nach den Regeln der Vektorrechnung addiert (Parallelogrammregel):

$$\vec{F}_{res} = \vec{F}_G + \vec{F}_S$$

In unserem Beispiel zeigt der Vektor der *resultierenden Kraft* gegen das Zentrum des Kreises: Die Resultierende wirkt also als *Zentripetalkraft*[41]. Also keine Spur einer Zentrifugalkraft – im Gegenteil: Durch das Zusammenwirken von Erde und Schnur wird die Kugel unaufhörlich gegen *innen* gezogen[42].

b: In Abb. 18 b) versetzen wir uns in die Kugel. Weil dort alles im Zustand der Ruhe verharrt, sagen die Physiker, dass sie sich im Gleichgewicht befindet: Alle Kräfte, die auf die Kugel wirken, müssen sich gegenseitig aufheben. Dazu muss man eine Kraft *erfinden,* welche die Wirkungen der Gewichtskraft und der Schnurkraft zunichte macht: die Zentrifugalkraft.

Der Körper ist im Gleichgewicht ⇒ $\vec{F}_G + \vec{F}_S + \vec{F}_{ZF} = \vec{0}$

c: In Abb. 18 c) denken wir uns die Kugel als fensterlose Kabine. Ein Beobachter, der sich darin befindet, kommt mit Hilfe eines Lots zu folgendem Schluss: „Ich weiss zwar nicht genau, wo ich bin, aber es zieht mich und alle Gegenstände, die mich umgeben, nach unten. Andererseits drückt mich der Fussboden nach oben". Wenn die Kabine an einem Seil hängt, wie bei einem Lift, der im Gleichgewicht ist, heben sich die Kräfte, die auf die Kabine wirken, gegenseitig auf:.

Der „Lift" ist im Gleichgewicht ⇒ $\vec{F}_G^{\,\prime} + \vec{F}_S = \vec{0}$

A 30 Überlegung zur Zentripetalkraft

a) Welche Bewegung würde die Kugel machen, wenn plötzlich mitten im Schwung die Zentripetalkraft nicht mehr wirken würde?

b) In welche Richtung rutscht ein Auto weiter, nachdem es plötzlich in einer Kurve auf Glatteis geraten ist?

Ob nun eine Zentrifugalkraft existiert, oder ob im Gegenteil eine Zentripetalkraft wirkt – oder weder noch, hängt von *unserer* Wahl des Bezugsrahmen ab.

---

41 Lat. *petere:* hinstreben zu

42 PETER LABUDDE: *Erlebniswelt Physik,* Dümmler, Bonn 1993, Kap. 9.2.

A 31 Überlegung zur Kurvenfahrt bzw. zum Kurvenflug

a) Das Glasgefäss in Abb. 17 wird von einer Schnur schief nach oben *gezogen.* Der kleine Herr im Glasgefäss wird jedoch durch den Boden in die gleiche Richtung *gedrückt.* Die Wirkung ist offensichtlich dieselbe. Verstehst Du nun, warum ein Rad- oder Motorradfahrer oder ein Flugzeug sich in einer Kurve nach innen neigen muss?

b) Erkläre mit Hilfe eines Kräfteplans, warum man sich schwerer fühlt, wenn das Flugzeug, in dem man sitzt, eine enge Kurve beschreibt.

8.2. Die Abplattung der Erde

A 32 Überlegung zur Kugelform in der Natur

Alle Himmelskörper sind mehr oder weniger kugelförmig. Einige Planeten und fast alle Monde haben eine steinharte Oberfläche – aber Steine sind sehr selten genau kugelförmig.
Überlege, welche Gegenstände der unbelebten Natur von sich aus die Kugelform anstreben.

Wenn wir die Erde als Ganzes betrachten, müssen wir sie eher mit einem riesigen Flüssigkeitstropfen vergleichen als mit einem riesigen Stein. Wenn ein Tropfen rotiert, so zieht er sich in die Breite und schrumpft zwischen den Polen etwas zusammen: er plattet sich ab.

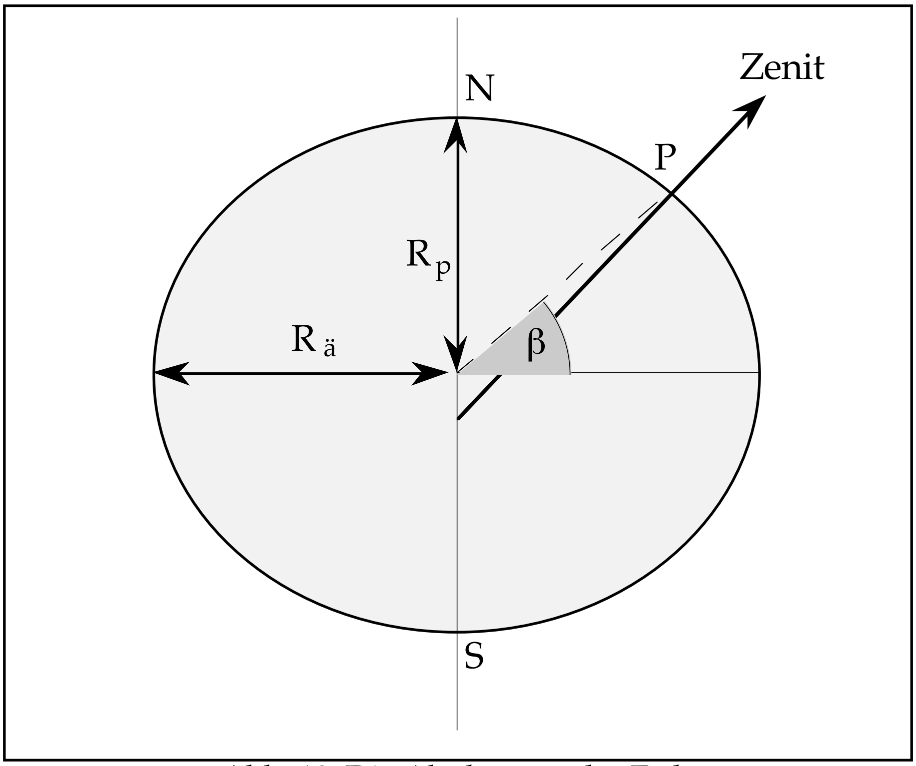

Abb. 19: Die Abplattung der Erde

Die Abplattung der Erde ist sehr gering: Der Äquatorradius ist nur um ca. 0.3% grösser als der Polradius. Wenn man einen Körper auf dem Pol genau wägt, so erweist er sich dort um rund 0.3% schwerer als wenn man ihn am Äquator wägt.

Die Abb. 19 zeigt auch, dass die Lotrichtung auf einer mittleren Breite ein wenig vom Erdmittelpunkt abweicht. Diese Südabweichung des Lots beträgt auf der rotierenden Erdei maximal 6 Winkelminuten.

8.3. Die Corioliskraft

Versuch

- Streu etwas Mehl auf die horizontale Fläche einer Drehscheibe.
- Dreh die Scheibe. Lass eine Stahlkugel frei über die Scheibe rollen.
- Deute die Spuren im Mehl: In welche Richtung (bezüglich ihrer Bewegungsrichtung) wird die Kugel jeweils abgelenkt,
  - wenn Du die Scheibe im Uhrzeigersinn,
  - bzw. im Gegenuhrzeigersinn rotieren lassen?

A 33 Überlegung zum Umlaufsinn der Erdrotation

a) In welchem Umlaufsinn (Uhrzeiger- oder Gegenuhrzeigersinn) würde man die Erde rotieren sehen, wenn man aus grosser Entfernung auf den Nordpol schauen könnte?

b) In welche Richtung werden bewegte Körper infolge der Erddrehung abgelenkt
- auf der Nordhalbkugel
- auf der Südhalbkugel
- am Äquator?

Solche Ablenkungen von bewegten Gegenständen treten in jedem rotierenden Bezugssystem auf. Zum Beispiel:

- Eine rollende Kugel zeichnet eine gekrümmte Spur auf die rotierende Drehscheibe.
- Auf der rotierenden Erde wird die Kugel des Foucault-Pendels auf der Nordhalbkugel stets nach rechts abgelenkt.
- Im Norden werden Flüsse nach rechts, im Süden nach links abgelenkt.

Es ist, als ob alle Gegenstand, welche sich auf rotierenden Bezugssystemen bewegen, wegen einer Kraft abgelenkt werden. Diese Ablenkungskraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung und heisst *Corioliskraft.*

8.4. Woran erkennt man Trägheitskräfte?

Sowohl die Zentrifugal- wie auch die Corioliskraft sind *Trägheitskräfte*. In den *Mathematischen Prinzipien der Naturlehre* erklärt NEWTON den Begriff *Trägheitskraft* wie folgt[43]:

> Diese Kraft ist stets dem Körper[44] proportional und unterscheidet sich nur in der Art der Auffassung von der Trägheit der Materie. Die Trägheit der

[43] ISAAC NEWTON: S.21.

> Materie bewirkt, dass jeder Körper von seinem Zustande der Ruhe oder der Bewegung nur schwer abgebracht wird, weshalb auch diese der Materie eigentümliche Kraft mit dem sehr bezeichnenden Namen: *Kraft der Trägheit* belegt werden könnte.

Beispiele:
- Wenn ein Flugzeug auf der Piste beschleunigt, drückt *es* die Passagiere nach hinten in den Sitz.
- Wenn ein Auto stoppt, drückt *es* die Insassen nach vorne gegen die Windschutzscheibe.
- In einem schnellen Karussell drückt *es* uns nach aussen (Zentrifugalkraft).
- Wenn der Kassierer vom Zentrum eines schnellen Karussells gegen die Peripherie schreitet, drückt *es* ihn zur Seite (Coriolis-Kraft).
- Wenn eine Primaballerina zur Pirouette ansetzt, streckt sie die Arme aus und nimmt Anlauf. Und wenn sie die Arme zum Körper (zur Drehachse) zurückzieht, wirbelt *es* sie wie wild im Kreis umher (Coriolis-Kraft).

Dieses „Es“ ist aber weder das startende Flugzeug (der Flugzeugsitz drückt die Passagiere nach vorne, nicht nach hinten), noch das bremsende Auto (die Sicherheitsgurten ziehen die Insassen nach hinten), noch das rotierende Karussell (die Sitzlehne drückt mich nach innen), sondern eben – *es*. Und an der Abwesenheit eines „Verursachers“ kann man die Trägheitskräfte erkennen.

A 34 Überlegungsaufgabe aus der Wetterkunde

a) Welche Rolle spielt die Corioliskraft in der Meteorologie
- bei den Passatwinden,
- beim Ausströmen der Luft aus einem Hochdruckgebiet,
- wenn ein Tiefdruckgebiet (eine Zyklone) aufgefüllt wird?

b) Warum wehen auf der Nordhalbkugel in mittleren geographischen Breiten feuchtwarme Westwinde und trockenkalte Ostwinde?

Schliesslich sind es nicht in erster Linie die ausgeklügelten Experimente der Physiker, sondern die Natur selber, welche die Drehung der Erde offenbart: In unseren mittleren Breiten sind es vor allem die feuchtwarmen Westwinde: Diese von Westen strömende Luft stammt aus dem Süden. Dort hat sie noch viel mehr Schwung in Richtung Osten als bei uns. Bei ihrer Reise gegen Norden kühlt sie sich ab, der Wasserdampf kondensiert, und es bilden sich Wolken. Der Schwung aus der Äquatornähe bleibt zum Teil erhalten, und die gegen Norden strömende Luft wird gegen Osten abgelenkt.

Der Ostwind dagegen ist oft kalt und trocken, weil er aus dem Norden stammt. Dort nimmt die Luft relativ wenig an der Drehung der Erde teil. Sie kann wegen der tiefen Temperatur auch wenig Wasserdampf aufnehmen. Wenn die Luft gegen Süden strömt, kann sie der zunehmend schnelleren Bewegung der Erdoberfläche nicht folgen und wird daher gegen Westen abgelenkt.

---

[44] Newton meint die Masse des Körpers.

9. Ausblick ins Weltall

9.1. Die Fixstern-Parallaxe

Der eigentliche Beweis, dass die Erde sich um die Sonne bewegt, liess bis ins 19. Jahrhundert auf sich warten. Infolge der jährlichen Bewegung der Erde um die Sonne müssen die Sterne je nach Lage eine Kreis-, eine Hinundher- oder eine Ellipsen-Bewegung bezüglich des „unendlich fernen Himmels“ beschreiben. Diese sogenannte *Fixsternparallaxe* kann man sich an einem naiven Modell wie folgt vorstellen: Beim Posten „Rumpfkreisen“ am Vita-Parcours bewegen sich die nahen Baumstämme bezüglich der weiter entfernten hin und her.

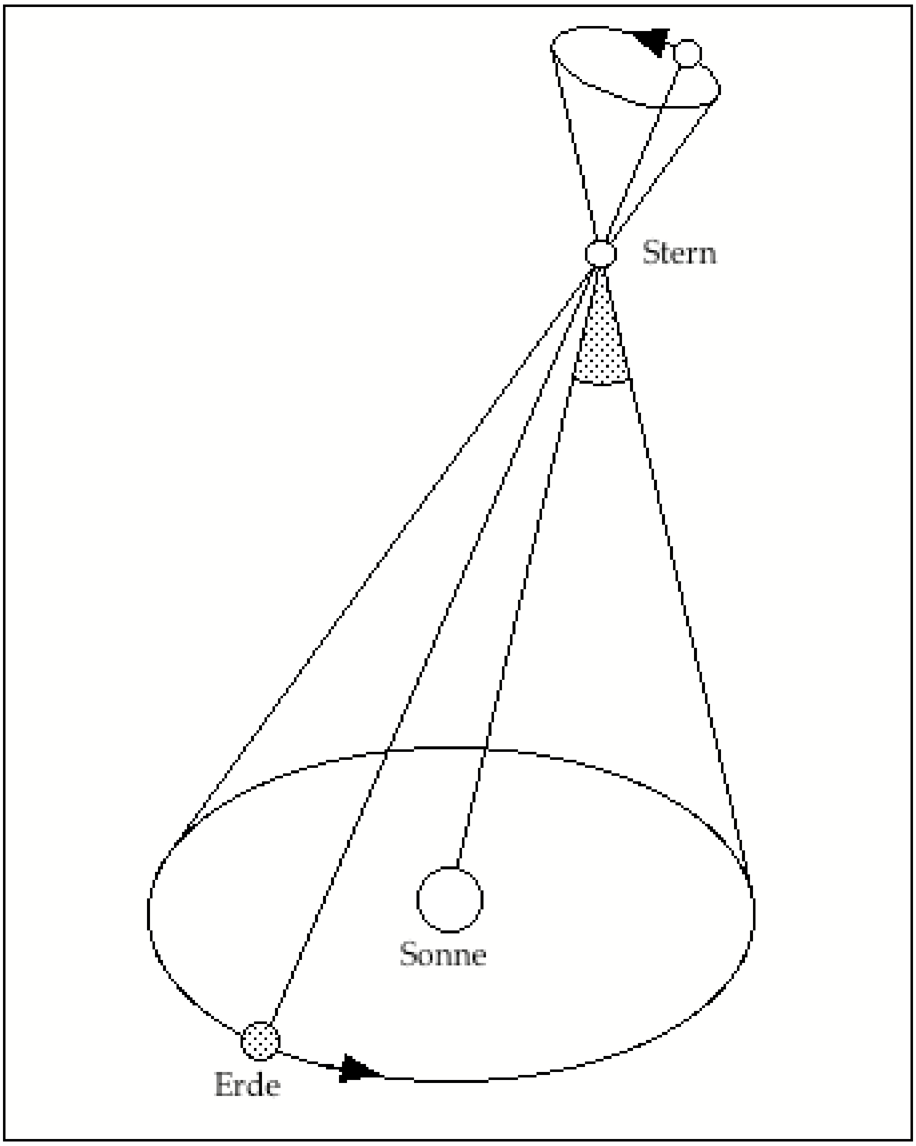

Abb. 20: Fixsternparallaxe

Der in Abb. 20 punktierte Winkel heisst *Parallaxe.* Er ist umso kleiner, je weiter der Stern vom Sonnensystem entfernt ist. Und da alle Sterne so weit entfernt sind, ist die Parallaxe stets kleiner als eine Bogensekunde.

Dass man die Fixsternparallaxe zur Zeit Galileis oder Newtons noch nicht beobachten konnte, war ein ernstzunehmendes Argument gegen das heliozentrische Weltbild (siehe Kap. 5.2). Erst gegen die Mitte des 19. Jhd. gelang es dem Königsberger Astronomen FRIEDRICH WILHELM BESSEL die Parallaxe eines Sterns zu messen. Er wählte einen schwachen Stern im Schwan (Cygni 61) und verglich dessen Position über ein Jahr lang mit den Positionen der Nachbarsterne, bei denen er vermutete, dass diese viel weiter entfernt sind. Über das Resultat seiner astronomischen Meisterleistung schrieb er am 9. Okt. 1838 in einem Brief an seinen Lehrer Olbers[45]:

> „Ich habe den wahrscheinlichsten Wert der jährlichen Parallaxe zu 0.3136", ihren mittleren Fehler zu 0.0202" gefunden. … so kann am wirklichen Vorhandensein dieser Parallaxe nicht mehr gezweifelt werden. Die Parallaxe entspricht einer Entfernung von 657700 AE, welche das Licht in 10.3 Jahren zurücklegt."

„AE" heisst „Astronomische Einheit" und bedeutet die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne. Im letzten Satz hat Bessel beiläufig die Masseinheit *Lichtjahr* (LJ) in die Astronomie eingeführt.

Zur gleichen Zeit hat der Astronom F. G. W. STRUVE die Parallaxe der „Wega", des hellsten Sterns der „Lyra" zu 1/4 Bogensekunden bestimmt (heutiger Wert: 0.12", was einer Entfernung von 27 LJ entspricht).

Die Beobachtung und die Vermessung der Fixsternparallaxe kann als Übergang von der *Astronomie* zur *Astrophysik* betrachtet werden:

- Die Fixsternparallaxe ist der erste unmittelbare Beweis für das heliozentrische Weltbild.
- Dank der Fixsternparallaxe kann man die Entfernungen der Sterne messen. Somit kann man auch die wahre Helligkeit der Sterne aus ihrer scheinbaren Helligkeit ausrechnen, denn die Helligkeit einer Lichtquelle nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab (Photometrisches Grundgesetz). Dabei entdeckten die Astrophysiker, dass die meisten Fixsterne, die wir von blossem Auge gut sehen, um Grössenordnungen heller sind als die Sonne.

Satellitenteleskope mit automatischer Bildverarbeitung ermöglichen heute Winkelmessungen mit einem Messfehler einer Tausendstel Bogensekunde. Damit können Entfernungen bis zu 330 Lichtjahre auf 10% genau gemessen werden.

A 35 Überlegung zur Sternparallaxe

a) Wie sieht die Parallaxenbewegung eines Sterns aus, der in der selben Ebene liegt, wie die Bahn der Erde um die Sonne?

b) Wie sieht die Parallaxenbewegung eines Sterns aus, der senkrecht zur Erdbahn liegt?

c) Wie sieht die Parallaxenbewegung eines Sterns aus, der schief zur Erdbahn liegt?

[45] LITTROW, J.J.: *Das Wunder des Himmels*, Dümmler, Bonn 1963 (11. Aufl.), S. 210

A 36 Überlegung zur Sternparallaxe

Überprüfe die folgende Behauptung: Die Parallaxenbewegung eines Sterns sieht von der Erde aus genau gleich aus wie die Bewegung der Erde um die Sonne aussähe, wenn sie von diesem Stern aus gesehen werden könnte.

A 37 Übung zum Vorstellungsvermögen bezüglich Sternentfernungen

Miss den Durchmesser eines kleinen Geldstücks.
Berechne die Entfernung des kleinen Geldstücks,
a) wenn es gleich gross aussehen soll wie die Bahn der Erde von der Wega aus gesehen.
b) wenn es so gross aussehen soll wie die Sonnenscheibe, wenn sich die Sonne in der gleichen Entfernung befinden würde wie die Wega.

9.2. Fixsterne und Weltall

Die meisten Sterne, die man mit blossem Auge gut sieht, sind – astronomisch gesehen – unsere unmittelbaren Nachbarn. Der nächste Fixstern ist im Nordhimmel nicht zu sehen: „Proxima Centauri" hat eine Entfernung von 4.3 Lichtjahren.

Der hellste Stern am Himmel heisst Sirius. Er steht links unterhalb des Orion und ist 8.6 LJ von uns entfernt. Seine Masse beträgt 2.5 Sonnenmassen. Er strahlt pro Sekunde über 20 mal soviel Energie aus wie die Sonne. Der Sirius hat kein Planetensystem, dafür einen einzigen Begleiter, der fast dieselbe Masse hat wie die Sonne. „Sirius B" ist aber nur etwa doppelt so gross ist wie die Erde. Solche Sterne nennt man „weisse Zwerge".

Ganz anders Beteigeuze, der helle rötliche Stern oben links im Orion. Ihre Entfernung beträgt 430 Lichtjahre. Sie ist 1000 mal so gross wie die Sonne, ihr Radius ist sogar 5 mal so gross wie der Radius der Erdbahn um die Sonne. Beteigeuze strahlt rund 10000 mal soviel Energie ab wie die Sonne. Solche Sterne heissen „rote Riesen". Ein anderer roter Riese, den man gut sehen kann, und zwar im Sommer, ist Antares, der Hauptstern des „Skorpion".

Die Sterne bilden meistens scheibenförmige Gruppen, die man *Galaxien* nennt. Unsere Galaxie ist in klaren Nächten als Milchstrasse sichtbar. Das ganze Milchstrassensystem hat einen Durchmesser von 80000 LJ und eine Dicke von etwa 6000 LJ. Die ganze Milchstrasse beherbergt rund 100 Milliarden Sterne. Die Sonne mit ihren Planeten ist 30000 LJ vom Zentrum der Milchstrasse entfernt und umrundet dieses ähnlich wie die Erde die Sonne. Eine einzige Runde der Sonne um das Zentrum der Milchstrasse dauert 250 Millionen Jahre.

Die nächste Nachbarin von der gleichen Art ist die 2.2 Millionen Lichjahre entfernte Andromenda-Galaxie. In klaren Nächten kann man den „Andromeda-Nebel" von blossem Auge sehen: Dazu suche man zuerst die „Kassiopeia", das bei uns immer sichtbare Sternbild, das einem grossen «W» gleicht. Die rechte Spitze des «W» ist ausgeprägter und bildet ein gleichschenkliges Dreieck. Dieses kann man als Pfeil benützen. Etwa 30° in Pfeilrichtung – das ist der Abstand zwischen den beiden kleinen Fingern, wenn sich die Daumen der gestreckten Hände bei gestreckten Armen berühren – kann man ein längliches Nebelchen finden, das aber sehr undeutlich ist, wenn man es anstarrt. Astronomen benützen den folgenden Trick: Sie schauen ein bisschen zur Seite. Dadurch wird die Andromedagalaxie merklich heller.

Das erkennbare Universum umfasst grössenordnungsmässig 100 Milliarden Galaxien. 1924 hat der amerikanische Astrophysiker EDWIN HUBBLE herausgefunden, dass sich alle Galaxien voneinander wegbewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie voneinander entfernt sind. Man kann das Universum mit einem Kuchen vergleichen, dessen Rosinen sich beim Aufgehen im heissen Backofen auch nach dem *Gesetz von Hubble* voneinander entfernen.

Das Spezialgebiet der Astrophysik, welches sich mit dem Universum als Ganzem befasst, heisst Kosmologie. Die Kosmologen nehmen an, dass das Universum vor rund 15 Milliarden Jahren quasi aus einem einzigen Punkt entstanden ist („Urknall“) und sich seither ausdehnt. Ob es sich in ferner Zukunft weiter ausdehnt und alle Sterne mit der Zeit erlöschen werden, oder ob es sich wieder einmal zusammenzieht zu einem „Endknall“ ist eine Frage die zur Zeit noch offen ist.

2001, P. Stettler , CH 8627 Grüningen