

Inhaltsverzeichnis

1. Erste Beobachtungen	1
1.1 Kalender	1
1.2 Sonnen- und Mondfinsternisse	4
1.3 Jahreszeiten	6
1.4 Sternbilder	7
2. Unser Sonnensystem	13
2.1 Das System Erde-Mond	13
2.2 Die inneren Planeten	14
2.3 Die äußeren Planeten	16
2.4 Zwergplaneten und Asteroiden	17
2.5 Kometen	18
2.6 Die Sonne	19
2.7 Die Milchstraße	20
3. Antike Astronomie	22
3.1 Babylonische Astronomie	22
3.2 Griechische Astronomie	23
3.3 Mittelalter und Renaissance	31
4. Von Kopernikus bis Kepler	34
4.1 Kopernikus	34
4.2 Galilei	36
4.3 Kepler	38
4.4 Nachweise der Bewegung	41
5. Das Newtonsche Gravitationsgesetz	46
5.1 Newtonsche Mechanik	46
5.2 Newtons Gravitationsgesetz	48
5.3 Das Dritte Keplersche Gesetz	55
5.4 Gezeiten und Resonanz	61
5.5 Dunkle Materie	63

6. Exoplaneten	70
6.1 Der Dopplereffekt	70
6.2 Begleiter von Pulsaren	70
6.3 Die Keplermission	72
6.4 Die Transitmethode.....	72
7. Einsteins Relativitätstheorie	73
7.1 Die spezielle Relativitätstheorie	73
7.2 Die allgemeine Relativitätstheorie	73
8. Warum leuchtet die Sonne?	74
8.1 Die Entdeckung der Quantentheorie	75
8.2 Der Zoo der Elementarteilchen	79
8.3 Fusion	80
9. Entfernungsmessung	83
9.1 Parallaxe im Sonnensystem	83
9.2 Parallaxe	83
9.3 Helligkeit	85
9.4 Cepheiden	86
9.5 Das Hertzsprung-Russel Diagramm	93
9.6 Neutronensterne und Schwarze Löcher	93
9.7 Rotverschiebung.....	93
9.8 Der Urknall.....	93
10. Strahlungsmessung	94
10.1 Licht.....	94
10.2 Neutrinoastronomie.....	94
10.3 Gravitationswellen.....	94
A. Klausuraufgaben	95

1. Erste Beobachtungen

In diesem Kapitel wollen wir auf einige Beobachtungen eingehen, die man mit dem bloßen Auge machen kann, und erklären, was es mit Kalendern, den Jahreszeiten, Sonnen- und Mondfinsternissen und Sternbildern auf sich hat.

1.1 Kalender

Die natürlichste Zeiteinheit, und eine, nach der sich das ganze höhere Leben der Erde richtet, ist der Tag. Klassisch war der Tag die Zeit zwischen Auf- und Untergang der Sonne; die andere Hälfte war die Nacht. Tag und Nacht hat man bei den Babyloniern in sechs Teile (Doppelstunden) eingeteilt, später bei Griechen und Römern in zwölf Stunden. Weil der Tag nicht immer die gleiche Länge hat (im Sommer sind die Tage bei uns auf der Nordhalbkugel länger als im Winter), waren auch die Stunden unterschiedlich lang.

Der iranische Wissenschaftler Abu Rayhan al-Biruni (973–1050) hat die Stunde in Minuten und Sekunden unterteilt; in der lateinischen Übersetzung seiner Werke wurde daraus *pars minuta prima* (der erste kleine Teil) und *pars minuta secunda* (der zweite kleine Teil), was sich im Laufe der Zeit zu Minuten und Sekunden entwickelt hat. Bedeutung hat diese Unterteilung erst mit dem Aufkommen mechanischer Uhren erhalten.

Heute gibt es zwei wesentlich verschiedene Definitionen eines Tags. Der Sonnentag ist entsprechend die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Meridiandurchgängen der Sonne; das sind die Zeitpunkte, an denen die Sonne genau im Süden steht (auf der nördlichen Halbkugel). Ein Sonnentag dauert 24 Stunden.

Der siderische Tag ist die Zeitspanne, in welcher sich die Erde einmal um ihre Achse dreht, bis also ein Stern (lat.: sidus, Genitiv sideris) am Himmel wieder an derselben Stelle steht. Der siderische Tag dauert 23 Stunden, 56 Minuten und 4,099 Sekunden. Wir werden weiter unten darauf eingehen, wie diese beiden Zeitlängen zusammenhängen.

Größere Zeitabschnitte werden in Monaten und Jahren gemessen. Ein Monat ist dabei eine etwas willkürliche Größe, die, wie der Name verrät, aus der Zeitdauer zwischen zwei Vollmonden entstanden ist. Diese Zeitspanne nennt man einen *synodischen Monat*, und dieser dauert im Schnitt 29 Tage, 12 Stunden und 43 Minuten.

Ein siderisches Jahr ist die Dauer, welche die Erde für einen Umlauf um die Sonne benötigt; dies sind 365 Tage 6 Stunden 9 Minuten und 9,54 Sekunden. Die

alten Kulturen hatten Mondkalender; weil die Dauer von 12 Mondphasen etwa $12 \cdot 29,5 \approx 354$ Tage beträgt, fehlen jedes Jahr 11 Tage. Diese hat man in der Regel dadurch ausgeglichen, dass man alle paar Jahre einen Schaltmonat eingeführt hat.

Erst Caesar hat 45 v. Chr. im Römischen Reich die Schaltjahrregelung aus Ägypten importiert, wo man diese seit 238 v. Chr. praktiziert hat. Danach wird alle vier Jahre ein Schalttag eingeführt. Man nennt diesen Kalender nach Gaius Iulius Caesar den Julianischen Kalender. Weil das Jahr aber nicht genau 365,25 Tage hat, sondern 365,2425, summiert sich dieser Fehler im Laufe der Jahrhunderte; im Mittelalter war der Fehler spürbar auf über eine Woche angewachsen. Erst Papst Gregor¹ XIII gelang es, eine neue Regelung durchzusetzen, wonach der Schalttag in allen Jahren ausfällt, welche durch 100, aber nicht durch 400 teilbar sind; dieser Kalender heißt der gregorianische Kalender. Zur Korrektur des Fehlers ließ Papst Gregor 10 Tage ausfallen: Auf Donnerstag, den 4. Oktober 1582, folgte Freitag, der 15. Oktober. Der gregorianische Kalender hat sich zuerst in den katholisch regierten Ländern durchgesetzt. Russland hat den gregorianischen Kalender bis zur Revolution behalten: Die Oktoberrevolution fand am 25. Oktober 1917 im julianischen und am 7. November 1917 im gregorianischen Kalender statt. Lenin führte dann im Februar 1918 den gregorianischen Kalender ein: auf den 31. Januar 1918 folgte der 14. Februar.

Die Namen der Tage

Dass der Sonntag (sunday) und der Montag (monday) nach Sonne und Mond benannt sind, dürfte niemanden überraschen². Auch die Namen der anderen Wochentage in den germanischen und romanischen Sprachen haben etwas mit Astronomie zu tun, nämlich mit Planeten.

Bei den Römern waren die sieben Tage nach den sieben beweglichen Himmelskörpern benannt, also Sonne, Mond und die fünf Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Im Französischen werden im wesentlichen dieselben Namen benutzt: Das Lateinische *dies lunae* ist im Französischen zu *lundi* geworden. Die einzigen Ausnahmen sind *samedi* (eine Verballhornung von *Sabbat*; im Spanischen heißt der Samstag etwa *sabado*) und *dimanche* (*dies domini*, der Tag des Herrn).

Als die Germanen im 4. Jahrhundert mit dem römischen Kalender in Berührung kamen, ersetzten sie die römischen Götter durch germanische; der Mars wurde durch Tyr (altenglisch *Tiw*) ersetzt, was auf Dienstag bzw. Tuesday führte; Merkur machte Wodan (Odin) Platz, was auf das englische Wednesday führte (der Wotanstag wurde bei der Christianisierung durch Mittwoch ersetzt). Jupiter haben die Germanen durch Donar (Thor) ersetzt, woraus Donnerstag bzw. Thursday

¹ Dieser wird uns im Zusammenhang mit der Ermordung Tausender französischer Protestanten in der Bartholomäusnacht wieder begegnen.

² Außer Joey in der amerikanischen Sitcom „Friends“; dort wollte er von Chandler an einen Termin am Donnerstag erinnert werden und sagte: „Thursday! Look, if you need help remembering just think of it like this: the third day. All right, Monday, one-day, Tuesday, two-day, Wednesday, when? huh? what day? Thursday! The third day, okay?“

wurde. Auch im Germanischen wurde aus der Liebesgöttin Venus eine weibliche Göttin, nämlich Frigga oder Fria, die Frau Odins (Freitag bzw. Friday).

Deutsch	Römer	Himmelskörper	Englisch	Französisch
Montag	dies Lunae	Mond	monday	lundi
Dienstag	dies Martis	Mars	tuesday	mardi
Mittwoch	dies Mercurii	Merkur	wednesday	mercredi
Donnerstag	dies Iovis	Jupiter	thursday	jeudi
Freitag	dies Veneris	Venus	friday	vendredi
Samstag	dies Saturni	Saturn	saturday	samedi
Sonntag	dies Solis	Sonne	sunday	dimanche

Auch die Schweden, Dänen und die Norweger bedienen sich der nordischen Götterwelt: mandag, tisdag, onsdag (Odins Tag), torsdag, fredag und söndag sind klar, der Samstag ist bei ihnen der lördag (Waschtag).

Die Portugiesen benennen ihre Tage nicht nach Göttern, sie zählen einfach durch: neben sábado und domingo gibt es segunda-feira (der zweite Tag, Montag), terça-feira (dritter Tag, Dienstag) usw. bis sexta-feira (sechster Tag, Freitag). Die Griechen halten es ähnlich, zählen aber nur bis zum fünften Tag; den Freitag nennen sie den „Tag der Vorbereitung“ (auf den Sabbat), Samstag ist „Sabbato“ und Sonntag Kiriaki (Tag des Herrn).

Der islamische Kalender ist ein reiner Mondkalender; ein Jahr besteht aus 12 Mondmonaten von 29 oder 30 Tagen und ist im Schnitt etwa $354\frac{1}{3}$ Tage lang. Damit entsprechen 33 Jahre islamischer Zeitrechnung etwa 32 Jahren christlicher Zeitrechnung. Während dieser 32 Jahre wandern etwa das Datum des Beginns des Ramadans einmal durch das Jahr. Die islamische Zeitrechnung beginnt mit dem Jahr der Auswanderung des Propheten Mohammed von Mekka nach Medina, also unserem Jahr 622. Dies ist 1398 Jahre her, aber im islamischen Kalender schreiben wir 2020 das Jahr 1441.

Unsere Monatsnamen gehen ebenfalls auf die Römer zurück. Deren Jahresbeginn war, wie bei fast allen antiken Kulturen, im Frühling; der erste Monat war also der März. Die ersten vier Monate hatten Namen; der März ist nach dem Kriegsgott Mars benannt, April kommt vermutlich vom Wort aperire (öffnen), Mai und Juni sind nach den Göttinnen Maia und Juno benannt. Die restlichen Monate wurden durchgezählt: Quintilis, Sextilis, September, Oktober, November, Dezember. Danach folgten Januar (benannt nach dem Gott Janus; dieser hatte zwei Gesichter, welche die Gegensätze Vergangenheit-Zukunft bzw. Anfang und Ende symbolisierten) und Februar (der Monat der Reinigung; februa heißt reinigen).

Weil die gewählten Konsuln seit 153 v. Chr. ihr Amt am 1. Januar antraten, bürgerte sich der Januar als Jahresbeginn ein. Dadurch wurde etwa der Dezember (zehnter Monat) zum zwölften.

Nach der Kalenderreform durch Gaius Iulius Caesar im Jahre 44. v. Chr. wurde dessen Geburtsmonat Iulius (Juli) genannt. Dessen Nachfolger Augustus ließ den sechsten Monat nach sich benennen. Der Nachfolger von Augustus, Tiberius, wollte den September nach sich benennen; dies hat sich aber nicht durchgesetzt.



Abb. 1.1. Kopf der Janus-Statue. Foto Fubar Obfusco, .

Das metrische System

Auch die Längeneinheit Meter hat einen astronomischen Ursprung. Die vielen verschiedenen Größen von Fuß, Elle und Meile, welche in Frankreich (ebenso wie in Deutschland) in Gebrauch waren, wollten die Franzosen um 1790 ein neues System einführen. Sie legten den Meter als den 1-Millionsten Teil der Entfernung von Nordpol zum Äquator fest und vermaßen (über viele Jahre hinweg) dann die Strecke zwischen Dünkirchen und Barcelona. Es ist also kein Zufall, dass diese Entfernung heute 10.002 km beträgt (die 2 km sind Messfehlern geschuldet) und der Äquatorumfang wenig mehr als 40.000 km. Andere Länder haben das metrische System im Lauf der Zeit übernommen; heute ist es in allen zivilisierten Ländern in Gebrauch – lediglich die USA messen noch in inch, foot und mile.

1.2 Sonnen- und Mondfinsternisse

Bei einer Sonnenfinsternis steht der Mond genau zwischen Erde und Sonne. Dieses Schauspiel könnten wir jeden Monat erleben, wenn die Mondbahn in der Ekliptik (die Ebene, welche die Erdbahn enthält) liegen würde. Tatsächlich ist die Mondbahn gegenüber der Erdbahn geneigt, und so sind Sonnenfinsternisse selten zu sehen. Sonnenfinsternisse können nur bei Neumond auftreten, weil der Mond dabei ja in der Nähe der Sonne stehen muss.

Bei einer Mondfinsternis bewegt sich der Mond durch den Schatten der Erde. Mondfinsternisse können also nur bei Vollmond auftreten.

- Video: [Sonnenfinsternis von Yogeshwar](#)
- Video: [Mondfinsternis von Astro-Views](#)

Der Saros-Zyklus ist ein Zyklus von Sonnenfinsternissen, der bereits den Babyloniern bekannt war: Bestimmte Sonnenfinsternisse wiederholen sich alle 18 Jahre.

So gehört die totale Sonnenfinsternis vom 11. August 1999 in Europa zum selben Saros-Zyklus wie die totale Sonnenfinsternis in den USA vom 21. August 2017; die nächste Finsternis in diesem Zyklus wird am 2. September 2035 in China stattfinden.

Synodische und Siderische Umlaufzeiten

Ein ganz bekanntes Rätsel dreht sich um folgende Frage:

Wie spät ist es, wenn der große und der kleine Zeiger einer Uhr erstmals nach 12 Uhr wieder übereinander stehen?

Eine schnelle Lösung geht so: innerhalb von 12 Stunden stehen die beiden Zeiger genau 11 Mal übereinander; also dauert es genau $\frac{12}{11}$ Stunden, was 1 h 5 min und etwas mehr als 27 s entspricht.

Ein ganz ähnliches Problem taucht in der Astronomie auf. Dort ist die Zeit, die ein Planet zum Durchlaufen seines Orbits braucht, die *siderische* Umlaufzeit; dies ist die Zeit, die er braucht, bis Sonne, Planet und ein geeigneter Stern wieder auf einer Geraden liegen.

Davon zu unterscheiden ist die *synodische* Periode (oder Umlaufzeit) zweier Planeten: das ist die Zeit, bis die Sonne und die beiden Planeten wieder auf einer Geraden liegen. Um eine Beziehung zwischen der synodischen Umlaufdauer s und den siderischen Umlaufdauern T und t der beiden Planeten zu finden, betrachten wir zuerst ein einfaches Beispiel. Wenn sich etwa Planet A alle zwei und Planet B alle drei Jahre um die Sonne dreht, dann ist bereits anschaulich klar, dass sie nach 6 Jahren wieder dieselbe Stellung gegeneinander einnehmen. Rechnerisch werden wir im allgemeinen Fall so vorgehen: Planet A dreht sich in 2 Jahren um 360° , hat also eine Winkelgeschwindigkeit³ von 180° pro Jahr. Entsprechend hat Planet B eine Winkelgeschwindigkeit von 120° pro Jahr. Also dreht sich Planet A um 60° pro Jahr schneller, und das bedeutet, dass er Planet B nach 6 Jahren überrundet, denn dann ist der Vorsprung auf $6 \cdot 60^\circ = 360^\circ$ angewachsen.

Im allgemeinen Fall sieht die Sache so aus: Sei SA die Gerade, auf der sich die Sonne S und der Planet A mit der kürzeren Umlaufdauer t befindet, und SB die Gerade durch S und den Planeten B. Die Achse SA dreht sich in t Jahren um 360° , somit dreht sie sich mit der "Winkelgeschwindigkeit" $\frac{360^\circ}{t}$. Die zweite Achse dreht sich entsprechend mit der Winkelgeschwindigkeit $\frac{360^\circ}{T}$. Also dreht sich der schnellere Planet mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\delta = \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{T} \right) \cdot 360^\circ$$

von der Achse des langsameren Planeten weg. Die beiden Achsen treffen sich nach s Jahren wieder, wenn also $\delta \cdot s = 360^\circ$ gilt. Daraus erhalten wir folgende Formel für die synodische Umlaufdauer:

³ Die übliche Geschwindigkeit misst, welchen Weg ein Objekt pro Zeiteinheit zurücklegt: $v = \Delta s / \Delta t$. Die Winkelgeschwindigkeit (vor allem bei Kreisbewegungen gibt an, um welchen Winkel pro Zeiteinheit sich das Objekt um das Zentrum bewegt: $\omega = \Delta \alpha / \Delta t$.

Satz 1.1. Sind $T > t$ die siderischen Umlaufzeiten zweier Planeten, dann ist deren synodische Umlaufzeit s gegeben durch

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{t} - \frac{1}{T}. \quad (1.1)$$

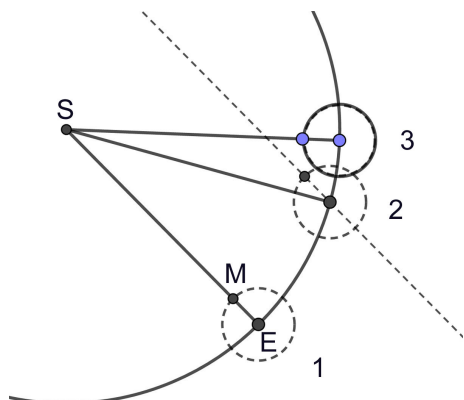


Abb. 1.2. Siderischer und Synodischer Monat

In Position 1 steht der Mond zwischen Sonne und Erde; es ist also Neumond. Nach 27,3 Tagen (Position 2) hat der Mond einen Umlauf um die Erde vollendet, steht also von der Erde aus gesehen in derselben Richtung am Himmel. Allerdings ist die Erde aber auf ihrer Bahn um die Sonne weitergewandert: Bis zum nächsten Neumond (Position 3) vergehen daher noch einmal 2,2 Tage.

Hier geht es um die Synode von Mond und Erde; unsere Formel $\frac{1}{s} = \frac{1}{t} - \frac{1}{T}$ liefert mit $T = 365,25$ d (Umlaufdauer der Erde um die Sonne) und $t = 27,32$ d (siderische Umlaufdauer des Mondes) daher

$$\frac{1}{s} = \frac{1}{27,32} - \frac{1}{365,25} \approx 0,3386;$$

Bilden des Kehrwerts liefert eine synodische Umlaufdauer von $s = 29,53$ d: Dies ist also die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Vollmonden.

1.3 Jahreszeiten

Die Ekliptik ist die Ebene, in welcher die Erdbahn liegt; diese liegt nicht fest im All, weil andere Planeten und vor allem der Mond die Bahn der Erde gravitativ beeinflussen. Die Ekliptik ist gegenüber der Äquatorebene um $23^\circ 26' 11,76''$ geneigt ($1'$ ist eine Bogenminute, also der 60te Teil eines Grads, und der 60te Teil einer Bogenminute ist die Bogensekunde $1''$).

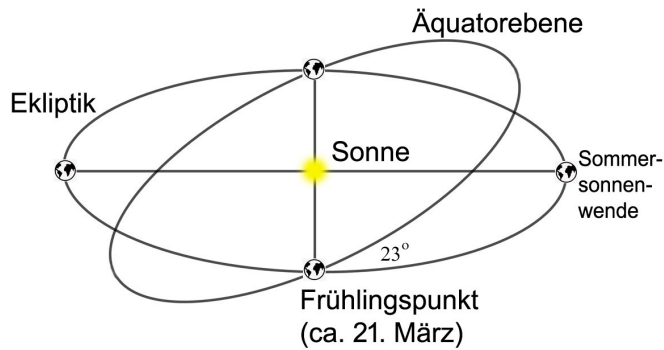


Abb. 1.3. Frühlingspunkt und Sommersonnenwende.

Die Schnittgerade von Ekliptik und Äquatorebene schneidet die Erdbahn in zwei Punkten: dem Frühlingspunkt und dem Herbstpunkt. Der Zeitpunkt, an dem die Erde im Frühlingspunkt steht, nennt man den astronomischen Frühlingsanfang; dies ist je nach Jahr der 19., 20. oder der 21. März. Entsprechend steht die Erde am 22., 23. oder 24. September im Herbstpunkt. An diesen beiden Zeitpunkten steht die Erdachse senkrecht auf die Verbindungsgerade von Erde und Sonne; dadurch dauern Tag und Nacht an diesem Tag auf der ganzen Erde genau gleich lang; man nennt dies die Tagundnachtgleiche (Äquinoktium).

Auf der Nordhalbkugel ist der längste Tag etwa am 21. Juni; am Nordpol geht dann die Sonne nicht unter. Weil die Sonne dann pro Tag länger scheint und außerdem hoch am Himmel steht, wird es wärmer als im Winter (wo die Nächte länger sind und die Sonne flach am Himmel steht). Auf der Südhalbkugel ist es genau andersherum: am Südpol geht die Sonne am 21. Juni gar nicht auf. Die Jahreszeiten verdanken wir also der Tatsache, dass die Drehachse der Erde nicht senkrecht auf die Ekliptik steht, sondern um 23° geneigt ist.

- Video: [Animation Erdbahn](#)

Das siderische Jahr, also die Umlaufdauer der Erde um die Sonne, hat 365,256363 Tage. Das anomalistische Jahr ist die Zeit, welche die Erde von einem Perihel bis zum nächsten braucht, hat 365,259636 Tage. Der Unterschied rührt daher, dass die Ellipsenbahn der Erde sich (u.A. wegen der Einflüsse der anderen Planeten) langsam dreht. Das tropische Jahr ist die Zeit zwischen zwei Durchgängen durch den Frühlingspunkt, und dauert 365,242188 Tage; auch hier wandert der Frühlingspunkt wegen der Präzession der Erdachse.

1.4 Sternbilder

Beobachtet man die Sterne am Himmel, so stellt man fest, dass sie sich, wie die Sonne tagsüber, im Laufe einer Nacht von Osten nach Westen bewegen. Im Norden

steht ein Stern, der Polarstern, der sich in der Nähe der Erdachse befindet und sich daher nur unwesentlich dreht.

Die Namen unserer Sternbilder gehen zum Teil auf die Babylonier und die alten Griechen zurück. Heute gibt es insgesamt 88 Sternbilder. Tierkreiszeichen sind Sternbilder, die in der Ekliptik (der scheinbaren Bahn der Sonne) liegen; davon gibt es zwölf.

Bereits die Griechen haben die Sterne nach Leuchtstärken eingeteilt (dies wird Hipparch im zweiten Jahrhundert vor Christus zugeschrieben; Ptolemäus hat das System in seinem *Almagest* benutzt und bekannt gemacht): es gibt Sterne erster, zweiter usw. bis sechster Größe, wobei letztere mit dem bloßen Auge gerade noch sichtbar sind. Heute können wir eine solche Einteilung viel genauer vornehmen: Sind Φ_0 und Φ_1 die gemessenen Lichtströme zweier Himmelskörper, dann unterscheiden sich ihre Helligkeiten um

$$m_1 - m_0 = -5 \frac{\log(\frac{\Phi_0}{\Phi_1})}{\log 100}.$$

Setzt man die Helligkeit von Wega gleich 0, ergeben sich daraus die Helligkeiten aller anderer Objekte.

Der Polarstern ist ein Stern zweiter Größe, hat also eine scheinbare Helligkeit von 2^m (zwei Magnituden). Die Venus kommt bei maximaler Helligkeit auf $-4^m,67$. Das Hubble-Teleskop kann noch Sterne bis zu 31^m wahrnehmen.

Die bekanntesten Sternbilder auf der Nordhalbkugel sind:

Der große Wagen ist ein Teil des Sternbilds großer Bär (ursa major). Der mittlere Stern der Deichsel heißt Mizar (offiziell zeta Ursae Majoris, ζ UMa), ein Name, der aus dem Arabischen kommt. Es ist ein (mit bloßem Auge sichtbarer) Doppelstern in einer Entfernung von etwa 83 Lichtjahren. Auf dieser Aufnahme kann man den Doppelsterncharakter erkennen.

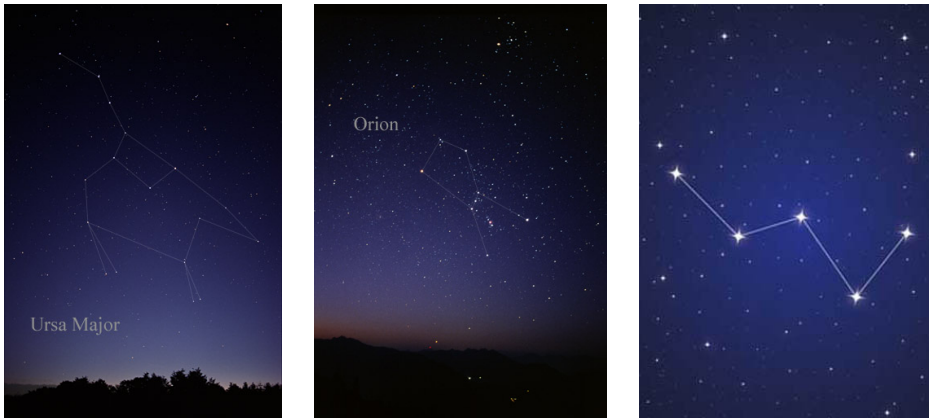


Abb. 1.4. Großer Bär (Ursa major) <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:UrsaMajorCC.jpg> nebst Orion und Kassiopeia

Der kleine Wagen besteht aus etwas lichtschwächeren Sternen und ist daher nicht ganz so leicht zu entdecken. Einer seiner Sterne ist der Polarstern, also ein Stern, auf den derzeit die Achse der Erde zeigt. Großer und kleiner Bär sind in unseren Breiten zirkumpolare Sternbilder, also solche, die zu jeder Jahreszeit zu sehen sind, weil sie nahe am Polarstern stehen.

Die Kassiopeia ist leicht zu finden wegen ihrer auffälligen W-Form. Die Spitze des W zeigt über Kepheus hinweg zum kleinen Wagen.

Zirkumpolare Sternbilder Weil wir etwa auf 48° nördlicher Breite liegen, sehen wir den Polarstern etwa 48° über dem Horizont. Dies bedeutet, dass alle Sternbilder, die weniger als 48° vom Polarstern entfernt sind, bei uns zirkumpolar sind. Durch die Messung der Winkelhöhe des Polarsterns kann man also herausfinden, auf welchem Breitengrad man sich befindet. Am Nordpol (Breitengrad 90°) steht der Polarstern im Zenit, in der Nähe des Äquators wird man ihn am Horizont sehen können.

Wie Sonne, Mond und Planeten gehen auch Sterne im Osten auf und im Westen unter; dies bedeutet, dass sich die zirkumpolaren Sternbilder im *Gegenuhrzeigersinn* um den Polarstern drehen.

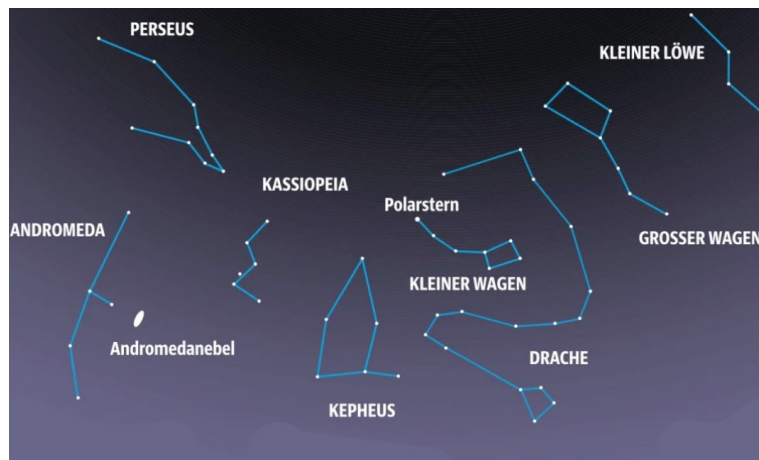


Abb. 1.5. Die bekanntesten zirkumpolaren Sternbilder

Die Bestimmung des Längengrads⁴ war dagegen über Jahrhunderte hinweg ein großes Problem: alle Methoden erforderten genau Uhren, und weil die einzigen genauen Uhren Pendeluhren waren, die bei Wellengang nicht funktionierten, führte dies zur Entwicklung von Uhren, die mit Hilfe von Federn angetrieben werden; die ersten Exemplare des englischen Uhrmachers Harrison waren noch riesig, später konnte man kleine und handliche Uhren herstellen.

⁴ Das Buch [17] von Dava Sobel erzählt die Geschichte der Bestimmung des Längengrads vielleicht nicht auf höchstem wissenschaftlichen Niveau, gibt aber einen ersten Einblick in die Geschichte dieser Frage.

Andere Sternbilder sind bei uns nur im Sommer oder nur im Winter zu sehen. Zu den bekanntesten Wintersternbildern gehört der Orion.

Das bekannteste Sternbild auf der Südhalbkugel ist das Kreuz des Südens (Southern Cross).

Übungen

1.1 Welche Phase hat der Mond bei einer Mondfinsternis?

Eine Mondfinsternis kann nur bei Vollmond auftreten.

1.2 Welche Phase hat der Mond, wenn er bei Sonnenuntergang aufgeht?

Dies geht nur bei Vollmond.

1.3 Wann geht der Vollmond unter?

Bei Sonnenaufgang.

1.4 Berechne die Winkelgeschwindigkeit eines Sekundenzeigers.

1.5 Berechne die Winkelgeschwindigkeit eines Objekts am Äquator.

1.6 Mit welcher Winkelgeschwindigkeit dreht sich die Erde um die Sonne?

1.7 Zeige, dass (1.1) gleichbedeutend ist mit

$$s = \frac{Tt}{T-t}.$$

1.8 Löse die Formel (1.1) nach t auf.

Antwort: $\frac{1}{t} = \frac{1}{s} + \frac{1}{T}$, also $t = \frac{Ts}{T+s}$.

1.9 Löse mit (1.1) das Problem der beiden übereinander stehenden Uhrzeiger.

1.10 Berechne die siderische Umlaufdauer des Mondes aus der synodischen.

Wir finden

$$t = \frac{Ts}{T+s} \approx \frac{365,25 \cdot 29,5}{365,25 - 29,5} \approx 27,3 \text{ d.}$$

1.11 Der Mond erscheint von der Erde aus unter einem Winkel von etwa $30'$ (ein halbes Grad). Bestimme den Durchmesser des Mondes aus seiner Entfernung von etwa 384.000 km.

1.12 Weil Mond und Sonne, wie man bei einer totalen Sonnenfinsternis sehen kann, von uns aus gesehen gleich groß erscheinen, kann man den Durchmesser der Sonne aus dem Durchmesser 3470 km des Mondes, dem Abstand Mond-Erde von 384.000 km, und dem Abstand Erde-Sonne von $1,5 \cdot 10^8$ km berechnen.

Man findet $d_S/d_M \approx 395$, also

- 1.13 ([18, S. 3]) Die Totalitätszone einer Sonnenfinsternis am 14. Januar 484 n. Chr. verlief nach Berichten über Korfu – Rhodos – Libanon. Astronomische Rechnung (die bereits Halley um 1700 machte) liefern eine Sonnenfinsternis mit demselben Datum, aber mit Totalitätszone Lissabon – Karthago – Zypern. Diese Totalitätszonen liegen etwa 30° (also 2 Stunden) auseinander. Dies lässt sich erklären, wenn man, wie Immanuel Kant (1724–1804) 1754 vorgeschlagen hat, die Bremsung der Erdrotation durch die Gezeiten akzeptiert. Berechne die Änderungsrate der Erdrotation in $\mu\text{s/a}$, die sich daraus ergibt. Messungen mit Atomuhren liefern eine Zunahme der Tageslänge um etwa $20\mu\text{s/a}$.

An devonischen Korallen (mit einem Alter von etwa 300 Millionen Jahren) zählt man etwa 400 Tagesringe pro Jahresring. Passt das zu den oben berechneten Zahlen? Wie viele Tage dauerte damals ein Jahr?

- 1.14 Der Weltrekord der Männer beim Marathon (42 km) liegt bei etwas mehr als 2 Stunden. Wie lange würde man bei dieser Geschwindigkeit bis zum Mond (384.000 km) brauchen?

- 1.15 Die Gezeiten werden in erster Linie durch den Mond verursacht. Würde sich der Mond nicht um die Erde drehen, gäbe es Flutberge in Mondrichtung und auf der Gegenseite, und diese wären 12 h auseinander. Weil der Mond nach 24 Stunden aber weitergewandert ist, ist auch die Zeit zwischen zwei Flutbergen etwas länger.

Berechne die Zeit zwischen zwei Flutbergen aus der siderischen Umlaufdauer $T = 27,3$ d des Mondes und der Rotationsdauer der Erde von $t = 1$ d.

Lösung. Aus $\frac{1}{s} = \frac{1}{t} - \frac{1}{T}$ ergibt sich $s \approx 1,038$ d, also 24,9 h; weil es zu jedem Zeitpunkt zwei Flutberge gibt, ist die Zeit zwischen zwei Flutbergen gleich 12,45 h.

- 1.16 Welcher Tatsache verdanken wir die Existenz der Jahreszeiten?
- 1.17 Wie ist der astronomische Frühlingspunkt definiert?
- 1.18 Was bedeutet Tag-und-Nacht-Gleiche, und wann findet diese statt?
- 1.19 Was bedeutet Winter- bzw. Sommersonnwende, und wann werden diese gefeiert?
- 1.20 Wie ist das Osterfest festgelegt?
- 1.21 Warum geht der Vollmond bei Sonnenuntergang auf, warum der Halbmond sechs Stunden früher oder später?
- 1.22 Erkläre den Begriff der Ekliptik.
- 1.23 Skizziere die bekanntesten Sternbilder (großer und kleiner Wagen, Orion, Kassiopeia) und erkläre, wie man den Polarstern findet.
- 1.24 Warum hat man in unserem Kalender alle vier Jahre einen Schalttag?
- 1.25 Warum ist Dezember nicht, wie der Name andeutet, der zehnte Monat?
- 1.26 Erkläre den Begriff des siderischen und des synodischen Monats. Welcher beschreibt die Zeit zwischen zwei Vollmonden?
- 1.27 Mit welcher Geschwindigkeit dreht sich der Mond bei Vollmond bzw. bei Neumond um die Sonne?

Die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne ist

$$v = \frac{2\pi R}{T} \approx 29,8 \text{ km/s},$$

weil der Abstand R zur Sonne 149,6 Millionen km und die Umlaufdauer T ein Jahr beträgt.

Die Geschwindigkeit des Monds auf seiner Umlaufbahn beträgt

$$v = \frac{2\pi r}{t} \approx 1 \text{ km/s}$$

wegen $r \approx 384\,0090$ km und $t \approx 27,3$ d.

Die Geschwindigkeit des Monds um die Sonne ist also bei Neumond etwa 29 km/s, bei Vollmond etwa 31 km/s.

2. Unser Sonnensystem

Bevor wir uns etwas der Geschichte der Astronomie zuwenden, wollen wir unser Sonnensystem vorstellen. Neben unserem eigenen Planeten und dem Mond gehören dazu natürlich die Sonne, die anderen Planeten und Zwergplaneten, Asteroiden und Kometen, sowie der Kuipergürtel und die Oortsche Wolke.

2.1 Das System Erde-Mond

Die Erde, der blaue Planet (die Farbe verdankt er dem vielen Wasser), ist der Planet, auf dem wir leben, und der einzige, von dem wir wissen, dass er Leben hervorgebracht hat. Die Erde ist über 4 Milliarden Jahre alt und der größte der inneren Planeten. Er besitzt ein starkes Magnetfeld, das uns vor kosmischer Strahlung schützt. Der magnetische Nordpol fällt nicht mit dem geographischen Nordpol (Schnittpunkt von Drehachse und der nördlichen Halbkugel) zusammen, und tatsächlich wissen wir, dass der magnetische Nordpol wandert, und dass das Magnetfeld der Erde immer wieder komplett zusammenbricht.

Die Erde besitzt eine Atmosphäre, die zu 78% aus Stickstoff, zu 21% aus Sauerstoff, und zu fast 1% aus Argon besteht. Das riesige Vorkommen an Sauerstoff liegt am pflanzlichen Leben. Der ebenfalls erstaunlich große Anteil an Argon (das mit Abstand häufigste Edelgas im Universum ist Helium) hat Gründe: es ist beim Zerfall des radioaktiven Kaliumisotops ^{40}K entstanden, welches schon bei der Entstehung der Erde vorhanden war.

Der Erdmond ist der fünftgrößte Mond des Sonnensystems und ist im Vergleich zu seinem Zentralplaneten außergewöhnlich groß. Wir nehmen heute an, dass der Mond kurz nach der Bildung der ersten Planeten durch den Zusammenstoß der Erde mit einem marsgroßen Protoplaneten Theia entstanden ist; daher ist er vor allem aus dem Material der Erdkruste und des Erdmantels aufgebaut.

Gezeiten

Der sichtbarste gravitative Einfluss des Mondes auf die Erde sind die Gezeiten, also Ebbe und Flut. Die Schwerkraft des Mondes erzeugt auf der ihm zugewandten und der ihm abgewandten Seite einen Flutberg. Weil die Erde unter diesem Flutberg rotiert, sorgt dieser durch Reibung für eine Abbremsung der Rotation, und die Erhaltung des Drehimpulses hebt den Mond auf eine höhere Umlaufbahn:

Tatsächlich wächst der durchschnittliche Abstand von Erde und Mond derzeit um 3,8 cm pro Jahr. Vor 310 Millionen Jahren dauerte der Tag nur 22 h; kurz nach der Entstehung des Mondes in einer Höhe von 30.000 km dauerte eine Umdrehung der Erde höchstens 14 h.

Präzession

Weil die Erde am Äquator abgeplattet ist und die Erdachse nicht senkrecht auf die Mondbahn steht, zieht der Mond die Erdachse in seine Richtung und verursacht damit eine Kreiselbewegung: Die Erdachse bleibt dabei immer um den gleichen Winkel von $23,44^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt, aber sie dreht sich im Laufe von etwa 25.800 Jahren einmal um den Normalenvektor der Ekliptik; in diesen 25.800 Jahren läuft der Frühlingspunkt einmal um die Erdbahn. Dies führt dazu, dass der Polarstern nicht immer Polarstern bleiben wird (und natürlich auch nicht immer gewesen ist).

2.2 Die inneren Planeten

In der Antike waren die fünf Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn bekannt. Später hat man Uranus, Neptun und Pluto entdeckt; Pluto wird heute nicht mehr zu den Planeten gezählt, weil in der Nähe seiner Umlaufbahn weitere Objekte die Sonne umkreisen. Daneben hat man seit 1801 eine ganze Reihe von Kleinplaneten entdeckt, von denen die meisten zwischen Mars und Jupiter die Sonne umkreisen.

Merkur

Merkur ist etwas größer als der Erdmond und hat eine sehr elliptische Bahn. Die Temperatur an der Oberfläche schwankt zwischen -170°C auf der Nachtseite und 430°C auf der Tagseite. Mit bloßem Auge ist er höchstens eine Stunde lang zu sehen, weil er sich maximal 28° von der Sonne entfernt.

Venus

Obwohl die Venus weiter von der Sonne entfernt ist als der Merkur, hat sie wegen des Treibhauseffekts (96% der Atmosphäre besteht aus CO_2) eine Oberflächentemperatur von etwa 470°C . Der maximale Winkelabstand zur Sonne beträgt 48° .

Die Venus wird auch Abend- oder Morgenstern genannt, weil sie bei maximaler Helligkeit das hellste Objekt am Himmel nach Sonne und Mond ist. Bereits die Babylonier haben erkannt, dass Morgen- und Abendstern derselbe Himmelskörper ist.

Ende 2020 haben Astronomen (Jane S. Greaves, Anita M.S. Richards, William Bains et al., *Phosphine gas in the cloud decks of Venus* Nature Astronomy, 2020)

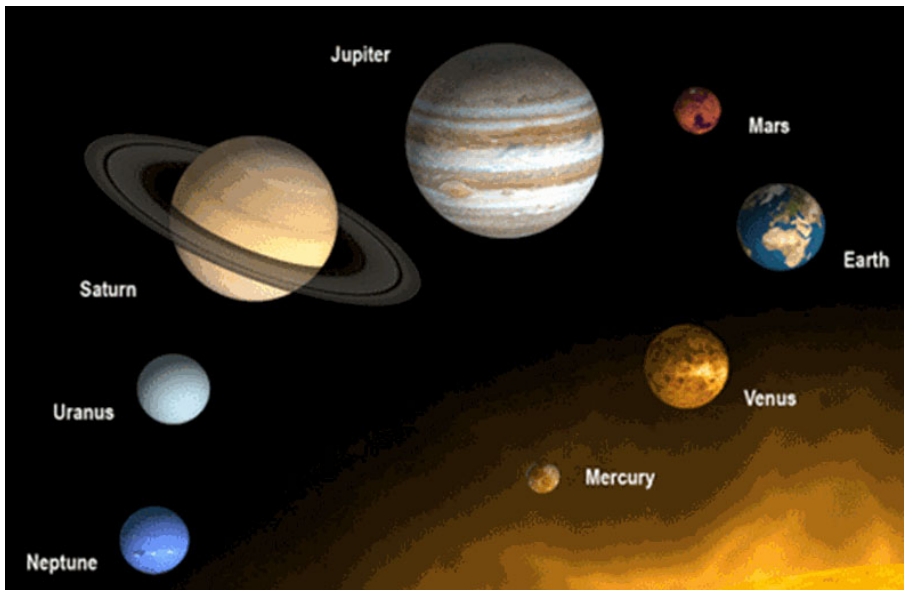


Abb. 2.1. Die Planeten unseres Sonnensystems; die Größenverhältnisse sind dabei nicht korrekt

in der Atmosphäre der Venus das hochgiftige Gas Monophosphan PH_3 nachgewiesen. Dass dieses Gas auf Jupiter und Saturn vorkommt, ist schon lange bekannt, und man versteht auch die Mechanismen, wie dieses Gas dort entsteht. Auf der Venus sind solche chemischen Vorgänge unbekannt. Eine Möglichkeit scheint die Erzeugung des Gases durch Mikroben in der Venusatmosphäre zu sein. Man sollte diese Nachricht aber mit großer Vorsicht genießen.

Mars

Mars ist neben der Venus der erdähnlichste unter den Planeten. Er ist aber nur halb so groß wie die Erde und hat zwei winzige Monde, Phobos und Deimos, die erst 1877 entdeckt wurden. Er dreht sich in 24 Stunden und 37 Minuten um seine Achse, seine Umlaufdauer ist etwa 1,9 Jahre. Auch seine Drehachse ist gegenüber seiner Bahnebene geneigt, und zwar um etwas mehr als 25° . Die geringe Schwerkraft an der Oberfläche (etwa $3,7 \text{ m/s}^2$) hat dazu geführt, dass Mars nur eine sehr dünne Atmosphäre besitzt, die zu 96 % aus Kohlendioxid CO_2 besteht.

Man vermutet schon geraume Zeit, dass an den Polkappen von Mars Wasser existiert. Radaruntersuchungen von Satelliten haben Ende 2020 gezeigt, dass es unter dem Eispanzer am Südpol wohl flüssiges (aber sehr kaltes) Wasser gibt. Vor drei Milliarden Jahren hat es auf dem Mars zum letzten Mal geregnet – eine Erinnerung daran, dass Erderwärmung und Klimawandel auch auf unserem Planeten für eine Neuverteilung des Regenwassers sorgen wird.

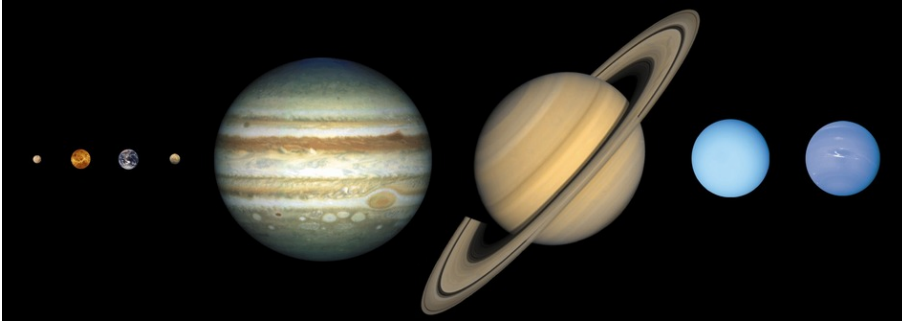


Abb. 2.2. Die Planeten unseres Sonnensystems <http://www.sun.org/de/images/sizes-of-planets>

2.3 Die äußeren Planeten

Während die inneren Planeten aus Gestein und Eisen bestehen, sind die äußeren Planeten Gasplaneten und haben keine feste Oberfläche.

Jupiter

Der Jupiter ist der massereichste Planet unseres Sonnensystems. Er hat einen Durchmesser von etwa 140.000 km und eine Dichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$. 2018 waren 79 Monde des Jupiter bekannt. 2020 wurden 40 weitere entdeckt¹, und man schätzt die Gesamtzahl der Monde mit einem Radius von mindestens 400 m auf etwa 600.

Der große rote Fleck ist ein Wirbelsturm, der Ende des 19. Jahrhunderts fast 40.000 km lang und 14.000 km breit war, und der schon im 17. Jahrhundert beobachtet worden ist. Heute ist er nur noch 16.500 km lang.

Saturn

Saturn ist mit einem Durchmesser von 120.000 km zwar nur leicht kleiner als Jupiter, hat aber wegen seiner geringen Dichte von $0,7 \text{ g/cm}^3$ eine deutlich kleinere Masse. Sein Mond Titan ist mit 5150 km Durchmesser der zweitgrößte nach dem Jupitermond Ganymed. Saturn besitzt 82 bekannte Monde; zwei davon, Janus und Epimetheus, haben fast die gleiche Umlaufbahn und tauschen alle vier Jahre ihre Umlaufbahnen.

Der Saturn besitzt ein ausgeprägtes Ringsystem; diese Ringe bestehen aus kleinen Partikeln. Alle 14,8 Jahre sieht man diese Ringe von der Seite, sodass sie nahezu unsichtbar sind.

¹ Siehe <https://arxiv.org/pdf/2009.03382.pdf>.

Uranus

Uranus wurde 1781 von Wilhelm Herschel entdeckt. Seine Rotationsachse liegt fast in der Bahnebene, was dazu führt, dass die Sonne an den Polen 42 Jahre lang scheint, bevor dann 42 Jahre Nacht ist. Auch Uranus hat ein Ringsystem, das aber nur mit sehr guten Teleskopen zu sehen ist.

Neptun

Weil der Uranus nicht ganz der Bahn folgte, die man für ihn berechnet hatte, befasste sich der Franzose Urbain Le Verrier damit und führte die Abweichungen auf einen unbekanntem Planeten zurück. Im August 1846 konnte er sogar dessen ungefähre Position berechnen und teilte sie seinen Landsleuten mit, die ihm aber nicht glaubten. Im September schrieb er daher an den deutschen Astronomen Johann Gottfried Galle, der sofort, nachdem er den Brief erhalten hatte, sein Teleskop auf die betreffende Stelle richtete und eine halbe Stunde später den neuen Planeten entdeckt hatte, 1 Grad neben der von Le Verrier berechneten Position.

In den 1980er wurde bei Sternverdunkelungen durch Neptun dessen Ringsystem entdeckt.

2.4 Zwergplaneten und Asteroiden

Pluto

Pluto wurde 1930 entdeckt und ist heute der massereichste bekannte Zwergplanet. Erst seit dem Vorbeiflug der Raumsonde New Horizons im Jahre 2015 haben wir gute Fotos von seiner Oberfläche. Man vermutet, dass er zu 70% aus Gestein und zu 30% aus Wassereis besteht; er gehört also sicherlich nicht zu den Gasplaneten. Pluto hat einen großen Mond, Charon, und vier kleinere, die alle in etwa derselben Ebene Pluto umkreisen. Aus diesem Grund vermutet man, dass diese Monde bei einem Einschlag eines Asteroiden auf Pluto entstanden sind.

Pluto und Charon umkreisen sich in etwa 6,4 Tagen und drehen sich dabei einmal um ihre eigene Achse; sie wenden sich also immer dieselbe Seite zu. Verantwortlich dafür sind Gezeitenkräfte.

Ceres & Co.

Der erste Zwergplanet im Asteroidengürtel wurde am 1. Januar 1801 von Giuseppe Piazzi entdeckt. Dieser behielt seine Entdeckung für sich; erst als er nicht mehr beobachtbar war, hat er seine Ergebnisse publiziert. Die wenigen Beobachtungen, die er bis dahin gemacht hatte, ließen mit den damaligen Mitteln keine Bahnbestimmung zu, sodass der Planet als verloren galt. Gauß hat sich dann mit neuen Methoden an die Bahnbestimmung gemacht und konnte voraussagen, wo er im Dezember 1801 wieder zu sehen sein würde.

Ceres hat einen Durchmesser von weniger als 1000 km und ist damit deutlich kleiner als der Erdmond. In den darauffolgenden Jahren wurden mit Pallas, Juno und Vesta drei weitere Objekte im Asteroidengürtel gefunden; inzwischen kennt man 650.000 Objekte in diesem Bereich. Man nimmt heute an, dass die Schwerkraft von Jupiter die Bildung eines Planeten in dieser Zone verhindert hat.

Das Ries

Dass die Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren wegen der Folgen eines Einschlags eines Asteroiden ausgestorben sind, ist allgemein bekannt. In unserer direkten Nachbarschaft gibt es ebenfalls zwei große Krater, die bei einem Einschlag von Asteroiden entstanden sind: das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken. Der Einschlag des über 1 km dicken Brockens im Ries erfolgte vor 14,6 Millionen Jahren; ein Satellit des im Ries eingeschlagenen Asteroiden schuf das 40 km entfernte Steinheimer Becken.

Vor dem Einschlag floss die Jagst in die Wörnitz und dann in die Donau, danach flossen Jagst und Kocher in die Brenz und dann in die Donau; vor 300.000 bis 150.000 Jahren hat sich die Alb so weit angehoben, dass die Jagst ihre Flussrichtung umkehrt und seither in den Neckar, den Rhein und in die Nordsee fließt.

2.5 Kometen

Kometen galten von alters her als Vorboten von Katastrophen. Nach der Lehre des Aristoteles sollten Kometen Erscheinungen in der irdischen Atmosphäre sein, aber Entfernungsbestimmungen durch Parallaxe zeigten in der Neuzeit schnell, dass dies unmöglich sein kann. Edmund Halley (1656–1742) konnte die Bahn eines großen Kometen von 1682 bestimmen und stellte fest, dass dieser Komet (heute der Halleysche Komet genannt) bereits 1607 und 1531 zu sehen gewesen war. Damit war erkannt, dass Kometen ebenso wie die Planeten die Sonne umkreisen, allerdings auf sehr elliptischen Bahnen. Der Halleysche Komet hat eine Umlaufdauer von 76,02 a, und eine Periheldistanz von 0,587 AE.

Die Erwärmung des Kometen in Sonnennähe führt zum Ausstoß von Gasen, welche durch den Sonnenwind weggetrieben werden und oft einen sichtbaren Schweif erzeugen.

Beim Auseinanderbrechen eines Kometen entstehen viele kleine Brocken, die sich im Laufe der Zeit auf dessen Bahn verteilen. Kreuzt die Erde eine solche Bahn, kann man sehr viele Sternschnuppen beobachten. Das bekannteste Beispiel sind die Perseiden, die jedes Jahr um den 12. August herum sichtbar sind. Die Perseiden entstammen dem Kometen 109P/Swift-Tuttle, der eine Umlaufdauer von 133 Jahren hat.

Trojaner

Lagrange hat berechnet, dass es auf der Umlaufbahn eines großen Planeten zwei Punkte gibt, auf denen kleinere Objekte eine stabile Umlaufbahn besitzen; diese

liegen 60° vor bzw. hinter dem Planeten. Derartige Objekte nennt man Trojaner, und die ersten wurden in der Umlaufbahn des Jupiter entdeckt. Inzwischen kennt man Trojaner von allen Planeten außer Merkur, und es gibt sogar zwei Saturnmonde (Tethys und Dione), welche Trojaner besitzen.

Kuipergürtel

Der Kuipergürtel umfasst das Gebiet zwischen 30 und 50 AE außerhalb der Neptunbahn; dort umkreisen etwa 70.000 Objekte mit mehr als 100 km Durchmesser die Sonne, von denen derzeit um die 2000 bekannt sind. Neben Pluto kennt man noch acht weitere Objekte mit einem Durchmesser von 1000 km oder mehr.

Oortsche Wolke

Man vermutet heute, dass langperiodische Kometen aus einer Gegend des Sonnensystems stammen, die man Oortsche Wolke nennt. Diese reicht bis in eine Entfernung von 100.000 AE, was 1,6 Lichtjahren entspricht. Man geht davon aus, dass dort viele Milliarden von Objekten die Sonne umkreisen.

Titius-Bode Reihe

Die Entfernungen der Planeten von der Sonne in astronomischen Einheiten genügen näherungsweise einer einfachen Gleichung, welche die deutschen Astronomen Titius (1766) und Bode (1772) zuerst aufgestellt haben. Sie haben bemerkt, dass man die Halbachsen der Bahnen Merkur bis zum damals bekannten letzten Planeten Saturn bekommt, wenn man in die Formel

$$a(n) = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

nacheinander $n = -\infty, 0, 1, 2, 4$ und 5 einsetzt:

n	$-\infty$	0	1	2	3	4	5	6
$a(n)$	0,4	0,7	1	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6

Die Tatsache, dass es für $n = 3$ keinen entsprechenden Planeten gab, sorgte für Verwunderung; die große Lücke zwischen Mars und Jupiter ist ja schon beim Betrachten der Umlaufdauern nicht zu übersehen. Ab 1800 hat man in dieser „Lücke“ zahlreiche Kleinplaneten (Planetoiden) gefunden, die mit dem bloßen Auge nicht zu sehen sind.

2.6 Die Sonne

Die Sonne ist der erdnächste Stern; sie hat einen Radius von fast 700.000 km und eine Masse von $2 \cdot 10^{30}$ kg. Der Kern der Sonne hat eine Temperatur von 15,6

Millionen K und mit 150 g/cm^3 eine Dichte, die 13 Mal größer ist als die von Blei. Aufbau; Sonnenflecken; Corona; Polarlichter

An der Sonnenoberfläche herrscht immer noch eine Temperatur von 6000 K. Die Korona, die bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar wird, hat nur eine sehr geringe Dichte. Die hohen Temperaturen ermöglichen es Teilchen in der Korona, das Schwerefeld der Sonne zu verlassen; diese bilden den Sonnenwind, der zum großen Teil aus Protonen und Elektronen besteht.

Die Sonne ist vor etwa 4,6 Milliarden Jahren entstanden. Als sich eine große Gaswolke, die zum größten Teil aus Wasserstoff bestand, unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenzog, wurde der Druck und die Temperatur im Innern schließlich so groß, dass die Kernfusion gezündet wurde und die Sonne zu scheinen begann.

2.7 Die Milchstraße

Die Sterne, die wir am Nachthimmel sehen, gehören alle zu unserer Milchstraße. Diese ist eine flache Scheibe mit einem Durchmesser von fast 200.000 Lichtjahren und einer Dicke von etwa 3000 Lichtjahren. Schätzungen der Gesamtmasse bewegen sich zwischen 400 und 1500 Milliarden Sonnenmassen.

Zu den Galaxien in unserer Nachbarschaft gehören neben einigen Zwerggalaxien die große und die kleine Magellansche Wolke und natürlich die Andromedagalaxie.

The Universe Song

Monty Pythons Songwriter Neil Innes hat für den Film *The Meaning of Life* ein Lied beigeuert, in welchem die wesentlichen Größenordnungen unseres Sonnensystems und unserer Milchstraße verewigt sind.

Whenever life gets you down, Mrs. Brown
And things seem hard or tough
And people are stupid, obnoxious or daft
And you feel that you've had quite enough

Just remember that you're standing on a planet that's evolving
And revolving at nine hundred miles an hour
That's orbiting at nineteen miles a second, so it's reckoned
The sun that is the source of all our power.
The sun and you and me and all the stars that we can see
Are moving at a million miles a day
In an outer spiral arm, at four hundred thousand miles an hour
In the galaxy we call the Milky Way

Our galaxy itself contains a hundred billion stars
It's a hundred thousand light years side to side
It bulges in the middle, six thousand light years thick

But out by us, it's just a thousand light years wide
 We're thirty thousand light years from galactic central point
 We go 'round every two hundred million years
 And our galaxy is only one of millions of billions
 In this amazing and expanding universe

The universe itself keeps on expanding and expanding
 In all of the directions it can whizz
 As fast as it can go, of the speed of light, you know
 Twelve million miles a minute and that's the fastest speed there is
 So remember, when you're feeling very small and insecure
 How amazingly unlikely is your birth
 And pray that there's intelligent life somewhere out in space
 'Cause it's bugger all down here on Earth

Übungen

- 2.1 Mit welcher Geschwindigkeit rotiert ein Objekt am Äquator, mit welcher auf dem 50ten Breitengrad?
- 2.2 Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich der Mond um die Erde?
- 2.3 Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich der Mond bei Vollmond bzw. bei Neumond um die Sonne?
- 2.4 Die Erde passt in etwa 1000 Mal in den Jupiter. Was sagt das über das Verhältnis von deren Radien aus?
- 2.5 Ordne die folgenden Objekte nach ihrem Abstand von der Erde: Andromedagalaxie; Mond; Polarstern; Saturn; Venus.
- 2.6 Welche der folgenden Größen könnte den Abstand eines benachbarten Sterns zur Sonne darstellen? 100 km, 10 AE, 10 Lj, 10^6 Lj.
- 2.7 Ordne die folgenden Materialien nach aufsteigender Dichte. Aluminium, Blei, Holz, Styropor, Wasser.
- 2.8 Kontrolliere die im Universe Song angegebenen Zahlen.
 1. Wie groß ist die Rotationsgeschwindigkeit der Erde an ihrer Oberfläche? Der Erdradius beträgt 6370 km, 1 Meile ist etwa 1,61 km.
 2. Mit welcher Geschwindigkeit dreht sich die Erde um die Sonne? Der Abstand Erde-Sonne beträgt etwa 150 Millionen km.
 3. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt 299.792 km/s. Welche Strecke legt das Licht in einer Minute, welche in einem Jahr zurück?
 4. Unsere Sonne ist etwa 28.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt und dreht sich einmal in etwa 230 Millionen. Zeige, dass die Bahngeschwindigkeit etwa 220 km/s beträgt.
 5. Die Sonne bewegt sich mit etwa 550 km/s relativ zur kosmischen Hintergrundstrahlung.

3. Antike Astronomie

Zu den ältesten religiösen Bauten neben den Pyramiden gehören Megalith-Konstruktionen wie Stonehenge und der Ring of Brodgar. Allen diesen Bauten gemein ist der Zusammenhang mit astronomischen Daten (Datierung von Sonnwendfeiern) und religiösen Zwecken, wobei wir über letztere wenig wissen, weil diese Bauten älter sind als erhaltene Schriften. Das älteste bekannte Bauwerk, das Astronomie und Religion verbindet, ist die Kreisgrabenanlage in Goseck (Sachsen-Anhalt), das vor fast 7000 Jahren errichtet wurde und manchmal als das älteste Sonnenobservatorium bezeichnet wird. Die Kreisgrabenanlage von Pömmelte (ebenfalls in Sachsen-Anhalt) ist mit etwas mehr als 4000 Jahren deutlich jünger.

Die Himmelsscheibe von Nebra ist die älteste bekannte Darstellung des Himmels mit Vollmond, Mondsichel, den Plejaden und anderen Sternen. Ihr Alter wird auf etwa 4000 Jahre geschätzt. Mond und Sterne sind aus Gold, die Scheibe selbst aus Bronze.

Wir werden die Geschichte der Astronomie hier nur streifen und verweisen für ausführliche Darstellungen auf die vielen sehr lesenswerten Bücher von Jürgen Hamel im Literaturverzeichnis.

3.1 Babylonische Astronomie

Mit Babyloniern bezeichnen wir eine ganze Reihe von Kulturen, die zwischen 4000 v. Chr. und 500 v. Chr. auf dem Gebiet des heutigen Irak (griechisch: Mesopotamien, das Land zwischen den Flüssen (Euphrat und Tigris)) aufblühten. Bereits bei den Sumerern im dritten Jahrtausend v. Chr. war die Astrologie zur Vorhersage von Ereignissen zentral. Im Laufe der Jahrhunderte lernte die Babylonier, Stellungen von Planeten aufzuzeichnen und später vorherzusagen, ebenso zeichneten sie Sonnen- und Mondfinsternisse auf.

Die Babylonier wussten, dass Morgen- und Abendstern derselbe Planet waren, dass sich gewisse Sonnen- und Mondfinsternisse alle 18,03 Jahre wiederholen (der Saroszyklus), und sie kannten die mittlere synodische Monatslänge (die Zeit zwischen zwei Vollmonden) als 29,5306 Tage – eine Genauigkeit, die man nur erreichen kann, wenn man die Mondphasen über 100 Jahre lang auswertet.

Die Babylonier waren der Überzeugung, dass wenn man die Bewegungen der Götter (wie Sonne und Mond) vorhersagen könne, das Gleiche für das Schicksal des Menschen gelten müsse. Sie suchten also überall nach Zeichen und entwickelten

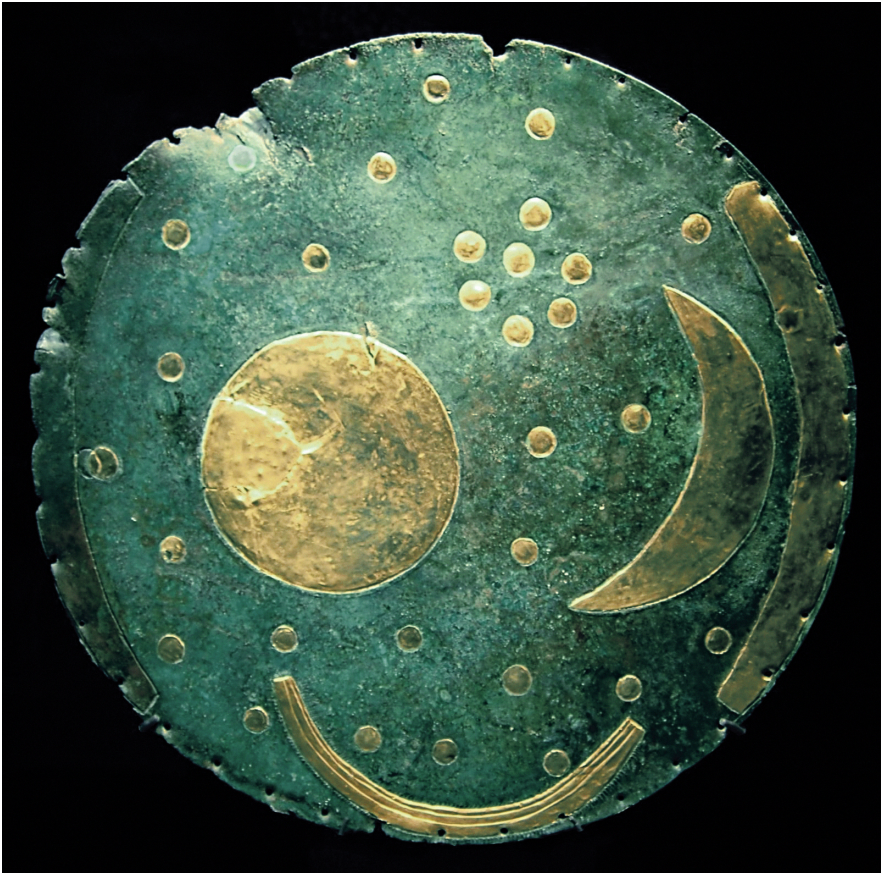


Abb. 3.1. Himmelsscheibe von Nebra. Von Dbachmann, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1500795>

insbesondere lange Listen mit Vorhersagen, die nach gewissen Ereignissen (etwa Finsternissen) erfolgen würden. Selbst zu Zeiten Jesu galten die Chaldäer aus Mesopotamien und die Perser als hervorragende Sterndeuter. Im Matthäusevangelium werden daher drei Magier aus dem Osten (die drei Weisen aus dem Morgenland) erwähnt, welche die Geburt des neuen Königs in den Sternen gelesen haben wollen.

3.2 Griechische Astronomie

Die griechische Kultur beginnt mit Homer, dem Autor der Ilias und der Odyssee, und mit Thales und Pythagoras. In nur wenigen Jahrhunderten erweitern die Griechen die Kenntnisse in Mathematik und anderen Wissenschaften beträchtlich. Bereits Aristoteles erkennt, dass die Erde kugelförmig ist: Dass bei Schiffen, die auf die Küste zufahren, immer erst die Masten sichtbar werden, ist ebenso ein Hinweis

auf die Krümmung der Erdoberfläche wie die Tatsache, dass man in Ägypten zur gleichen Jahreszeit andere Sterne sieht wie in Griechenland. Auch der kreisförmige Schatten der Erde bei einer Mondfinsternis ist ihm bekannt.



Abb. 3.2. Offshore Windpark https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Offshore_windpark_Thorntonbank.jpg

Die wichtigsten Daten aus der Geschichte der griechischen Astronomie sind die folgenden.

- 28. Mai 585 v.Chr.: Eine Schlacht zwischen Medern und Lydern wird nach einer Sonnenfinsternis abgesagt; die Armeen schließen Frieden. Thales soll die Sonnenfinsternis vorhergesagt haben. Auch wenn dies eine etwas zweifelhafte Legende ist, zeigt sie doch, dass die Griechen damals bereits wussten, dass man Sonnen- und Mondfinsternisse vorhersagen kann.
- 6. Jahrhundert v.Chr.: Der Tunnelbau auf der Insel Samos belegt, dass die Griechen schon damals über ausgezeichnete Mittel der Feldmessung verfügten.
- 450 v.Chr.: Anaxagoras erklärt die Mondphasen durch die Sonne.
- 270 v. Chr.: Aristarch bestimmt die Entfernung des Mondes zu etwa 20 Erdradien (richtig wären etwa 60 Erdradien).
- 240 v. Chr.: Eratosthenes bestimmt den Erdradius.
- Hipparch (128 v. Chr.) benutzt eine Sonnenfinsternis, um zu zeigen, dass der Mond ca. 90 Erdradien von uns entfernt ist.
- Claudius Ptolemäus (ca. 100–160) schrieb 13 Bücher über Mathematik und Astronomie, in denen er auch babylonische Beobachtungen benutzte.

Aristarch bestimmt die Entfernung zum Mond

Aristarch hat ein ganzes Buch über die Bestimmung der Entfernung von Erde und Mond geschrieben. Dort leitet er mit viel Geometrie aus Beobachtungen bei einer Mondfinsternis Abschätzungen für diese Entfernung her.

Der Kern der Idee ist folgender¹: Bei einer Mondfinsternis ist der Mittelpunkt des Mondes für etwa 3 h im Kernschatten. Der Kernschatten ist ein wenig kleiner als der Durchmesser der Erde. Der Mond braucht für eine Umrundung der Erde 27,3 d. Das Verhältnis von dem Umfang $2\pi R$ des Orbits zum Durchmesser $2R$ der Erde ist also in etwa dasselbe wie das zwischen einer Umlaufdauer des Mondes und der Dauer der Mondfinsternis:

$$\frac{2\pi R}{2r} \approx \frac{27,3 \cdot 24}{3},$$

was auf $R \approx 70r$ führt.

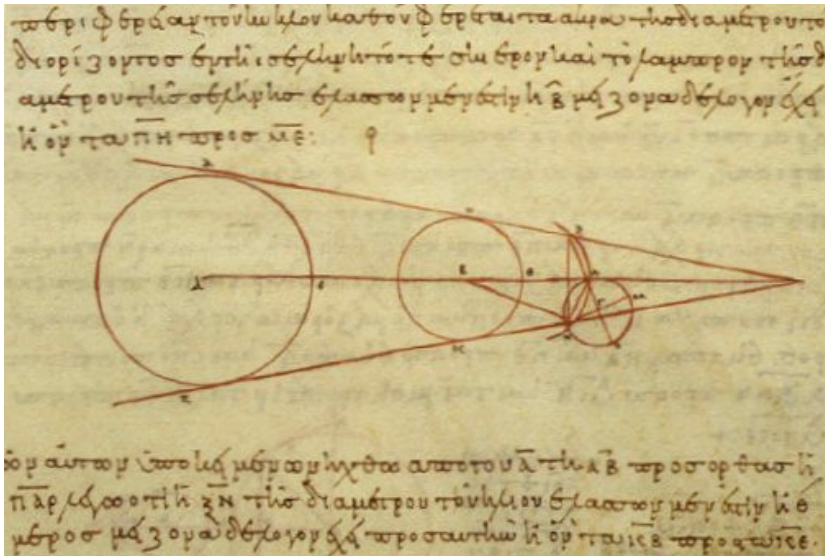


Abb. 3.3. Aus einer byzantinischen Abschrift eines Manuskripts Aristarchs

Aristarch erkannte, dass die Sonne viel größer sein musste als die Erde. Diese Tatsache legte ihm nahe, dass die Erde um die Sonne kreisen sollte: Aristarch vertrat als erster ein heliozentrisches Weltbild. Dies konnte sich aber nicht durchsetzen.

- Video von Gassner [Aristarch](#)

Eratosthenes bestimmt den Radius der Erde

Eratosthenes hatte gehört, dass sich um den 21. Juni herum in Syene (Ägypten; heute heißt die Stadt Assuan) die Sonne in einem tiefen Brunnen spiegelte, also

¹ Wie ein Blick auf Abb. 3.3 zeigt, nahm Aristarch im Gegensatz zu uns nicht an, dass die Sonnenstrahlen parallel einfallen.

direkt im Zenit stand. In Alexandria, wo Eratosthenes der Bibliothekar der größten Bibliothek des Altertums war, konnte er dagegen einen Winkel messen, der etwa dem 50. Teil des Vollwinkels entspricht; das ergibt $360^\circ/50 \approx 7,2^\circ$. Der Abstand von Syene und Alexandria war etwa 5000 Stadien (vielleicht abgeschätzt mit Hilfe der Zeit, die eine Karawane von Syene nach Alexandria unterwegs war).

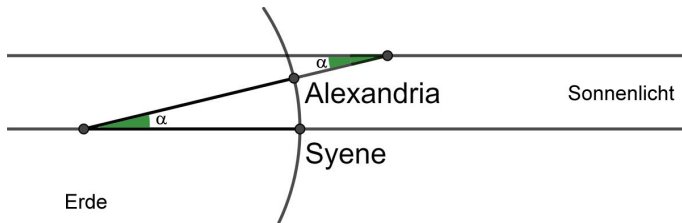


Abb. 3.4. Eratosthenes misst den Erdumfang

Eratosthenes nahm an, dass die Sonne so weit von der Erde entfernt ist, dass die Sonnenstrahlen praktisch parallel sind. Die Skizze in Abb. 3.4 zeigt, dass der Winkel zwischen Alexandria und Syene, vom Erdmittelpunkt aus gesehen, gleich dem gemessenen 50. Teil des Vollwinkels ist („Wechselwinkel“!). Da die Entfernung zwischen Syene und Alexandria daher etwa dem 50. Teil des Erdumfangs entspricht, ergibt sich dieser zu etwa 252 000 Stadien.

Nimmt man an, dass 1 Stadium etwa 164 m entspricht, kommt man auf einen Wert von 41 000 km für den Erdumfang und knapp 6 400 km für den Erdradius. Nimmt man ein Stadium als etwa 185 m an, so führt dies auf einen Erdumfang von 46 000 km. Ein ägyptisches Stadium entspricht dagegen etwa 157,5 m und liefert 39 700 km.

Archimedes

Archimedes ist einer der größten Mathematiker aller Zeiten; seine Bestimmung von Oberfläche und Volumen einer Kugel gehört auch heute noch zu den ganz großen intellektuellen Leistungen.

Zwar ist sein Werk für die Astronomie nicht von wesentlicher Bedeutung, allerdings hat er auch in der Physik bedeutende Ergebnisse erzielt. Die Kräfte beim Hebel und beim Auftrieb hat er als erster quantitativ beschrieben und damit gezeigt, dass der Mathematik bei der Erforschung der Natur eine wesentliche Rolle zukommt.

Der Auftrieb. Als Archimedes von seinem König dazu aufgefordert worden war herauszufinden, ob eine für ihn gefertigte Krone aus reinem Gold ist, fand er die Lösung des Problems der Bestimmung des Volumens beim Baden: wird ein Objekt in ein randvoll gefülltes Becken getaucht, ist dessen Volumen gleich dem des herausgelaufenen Wassers. Die Legende will wissen, dass er danach nackt durch die Straßen von Syrakus lief und „Heureka“ (Ich hab’s gefunden) rief.

Im Zusammenhang damit entdeckte er auch das Gesetz des Auftriebs: Der Auftrieb eines Körpers ist genau so groß wie die Gewichtskraft des von ihm verdrängten Wassers.

Das Hebelgesetz. Greifen gleichgerichtete Kräfte F_1 und F_2 senkrecht am Hebel an, und zwar im Abstand r_1 bzw. r_2 vom Drehpunkt, dann herrscht genau dann Gleichgewicht, wenn $F_1 r_1 = F_2 r_2$ ist.

Lässt man Kräfte in beliebigem Winkel am Hebel angreifen, braucht man Vektoren. Bezeichnet \vec{r} den Vektor, der vom Drehpunkt auf den Angriffspunkt der Kraft \vec{F} zeigt, dann erzeugt diese Kraft ein Drehmoment \vec{M} , das durch das Kreuzprodukt

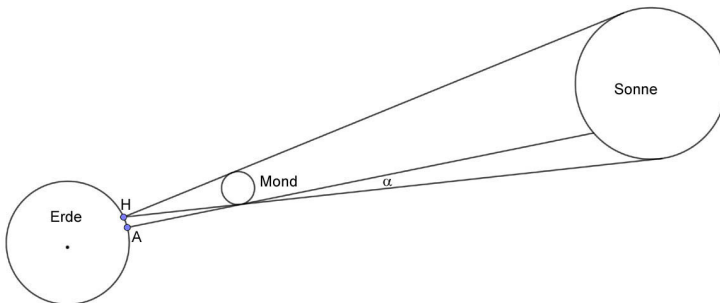
$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

gegeben ist. Zieht die Kraft also in Richtung des Hebelarms, dann sind \vec{r} und \vec{F} parallel, und es ergibt sich ein Drehmoment 0. Steht die Kraft senkrecht auf den Hebelarm, ist $|\vec{r} \times \vec{F}| = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}|$, und es ergibt sich das Hebelgesetz von Archimedes.

Archimedes konnte mit diesem Prinzip auf eine geniale Art und Weise Flächen von Parabelsegmenten oder Volumina von Kugeln und Paraboloiden bestimmen.

Hipparch bestimmt die Entfernung zum Mond

Hipparch wusste, dass während einer totalen Sonnenfinsternis am Hellespont (Nordtürkei) die Sonne in Alexandria nur zu 80 % bedeckt war.



Weil die Sonne einen Winkeldurchmesser von $0,5^\circ$ hat, ist der Winkel $\alpha \approx 0,1^\circ$. Für die Strecke HA zwischen Hellespont (H) und Alexandria (A) gilt also einerseits $\overline{HA} \approx 2\pi r \cdot \frac{9}{360}$ (die beiden Orte sind etwa 9 Breitengrade auseinander); andererseits ist $\overline{HA} \approx 2\pi R \cdot \frac{0,1}{360}$. Dies führt auf $R \approx 90r$.

Der Antikythera-Mechanismus

Im Jahre 1900 fanden Schwammtaucher vor der Küste der griechischen Insel Antikythera in einem Schiffswrack unter Anderem ein Gerät aus Bronze, an dem noch einige Zahnräder zu erkennen waren. Münzfunde auf dem Schiff legen nahe, dass das Schiff zwischen 70 und 60 v.Chr. untergegangen sein muss.

Langjährige Untersuchungen des Geräts haben ergeben, dass es Sonnen- und Mondkalender enthielt, babylonische Tierkreiszeichen, und einen Kalender zur Vorhersage von Finsternissen. Dies ist das einzige derart komplexe Gerät, das aus der Antike bekannt ist.

- Antikythera
- Lego

Ptolemäus

Ptolemäus legte in seinem Almagest die astronomischen Kenntnisse der Griechen nieder. Dieses Buch findet später seinen Weg nach Indien. Von dort bringen es die Araber wieder zurück nach Europa, wo es wieder zur Grundlage der Astronomie wird.

Im Almagest beschreibt er das geozentrische Weltbild, das man nach ihm auch das Ptolemäische Weltbild nennt. Er geht von der Annahme des Aristoteles aus, wonach sich Himmelskörper nur mit konstanter Geschwindigkeit auf Kreisbahnen bewegen können.



Abb. 3.5. Retrograde Bewegung des Mars aus dem Jahre 2003; die kleinen Punkte im Hintergrund stammen vom Uranus. Foto:

<https://www.astro.com/astrowiki/de/R%C3%BCckl%C3%A4ufigkeit>

Eine Beobachtung, die sich nur schwer im geozentrischen Weltbild erklären lässt, ist die retrograde Bewegung der Planeten. Damit ist gemeint, dass Planeten zu manchen Zeiten rückläufig sind oder sich auf Schleifen bewegen (siehe etwa Abb. 3.5). Im heliozentrischen Weltbild ist das eine einfache Folge der Tatsache, dass sich innere Planeten schneller bewegen als äußere und somit gegenüber dem Fixsternhimmel an diesen vorbeiziehen (siehe Abb. 3.6).

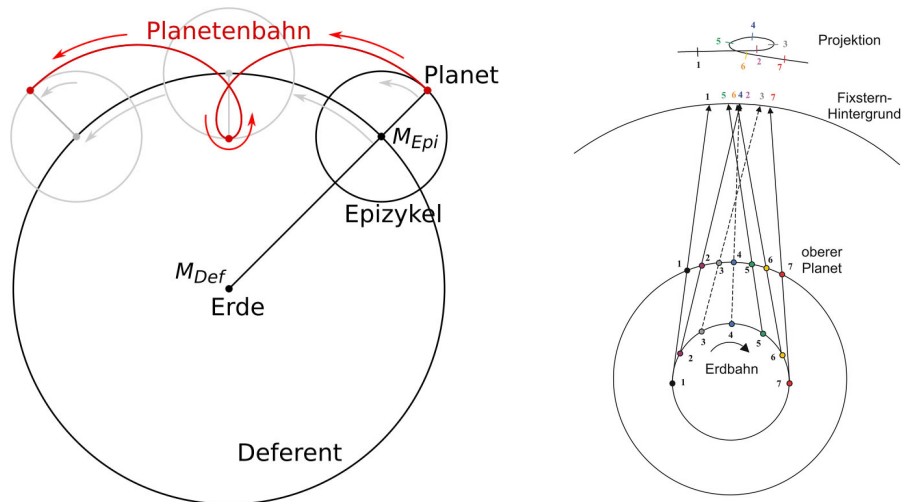


Abb. 3.6. Epizykel <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68445640> und Erklärung im heliozentrischen Weltbild <https://de.wikipedia.org/wiki/Planetenschleife>.

Ein ähnliches Problem ergibt sich bei der Beschreibung der Bewegung von Merkur und Venus, die sich ja immer in der Nähe der Sonne befinden. Auch das lässt sich mit Epizykeln hinbiegen, allerdings verlaufen die eigentlichen Bahnen von Merkur und Venus beide zwischen Erde und Sonne (siehe Abb. 3.7), drehen sich effektiv als weder um die Erde noch um die Sonne.

Zwar müsste man auch im geozentrischen Weltbild Phasen der Venus erkennen, allerdings wäre die Venusscheide zu jedem Zeitpunkt höchstens halb beleuchtet.

Römischer Limes

Die Römer pflegten nur sehr wenige Naturwissenschaften; im wesentlichen beschränkte sich ihr Interesse auf die Feldmessung. Dort brachten sie es allerdings, ebenso wie beim Bau von Aquädukten (Wasserstraßen zur Bewässerung von Städten) oder beim Bau von Wassermühlen, zu großen Leistungen. So verläuft der Limes zwischen Walldürn und Welzheim auf einer Strecke von 80 km vollkommen gerade, und die Wachtürme weichen maximal einige Meter von dieser Linie

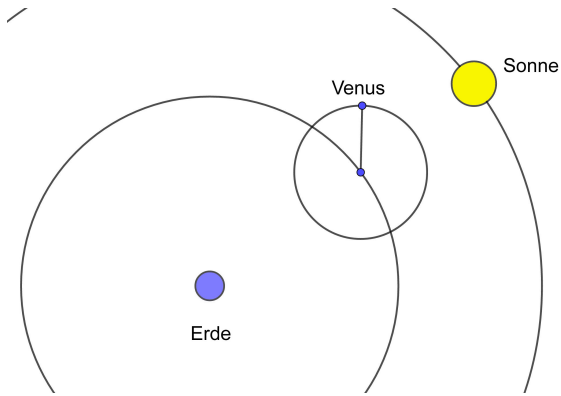


Abb. 3.7. Bahn der Venus im ptolemäischen Weltbild

ab. Man vermutet heute, dass dieser Teil des Limes am Polarstern ausgerichtet worden ist.

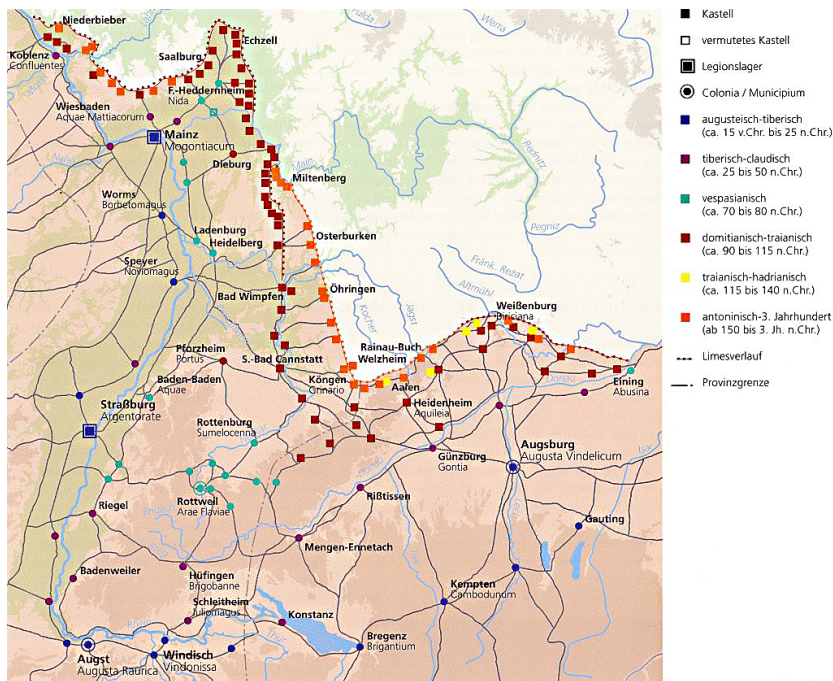


Abb. 3.8. Der Limes zwischen Welzheim und Walldürn.

3.3 Mittelalter und Renaissance

Mit dem Siegeszug des Christentums im ehemaligen Römischen Reich und später in ganz Europa ging es mit der Wissenschaft bergab. Wissenschaftliche Erkenntnisse (Kugelgestalt der Erde, Astronomie, Mathematik) gingen ebenso verloren wie technische Errungenschaften (Verarbeitung von Erzen zu Metall). Bis zur Renaissance, der Wiederentdeckung der griechischen Kultur, fand Wissenschaft nur im islamisch beherrschten Teil von Europa, sowie in Indien und China statt. Wir wollen im Folgenden nur einen arabischen Wissenschaftler vorstellen, verweisen aber darauf, dass wir den arabischen Gelehrten die Einführung des Dezimalsystems (das sie aus Indien übernommen hatten) und die grundlegenden Techniken der Algebra verdanken.

Für die Bestimmung des Erdradius nach Eratosthenes muss man die Entfernung zweier weit entfernter Punkte auf der Erdoberfläche messen. Für einen halbwegs genauen Wert sind dazu kostspielige Expeditionen notwendig.

Der arabische Gelehrte al-Biruni (973–1048) hat sich daher eine Methode einfallen lassen, die sich mit weit weniger Aufwand durchführen lässt, weil die zu vermessenden Entfernungen deutlich kleiner sind (naturgemäß erhöht sich dadurch der Einfluss von Messfehlern).

Al-Biruni stellte sich auf einen Berg, der in einer flachen Ebene stand, und beobachtete, wie weit es bis zum Horizont ist (diese Strecke muss man dann messen).

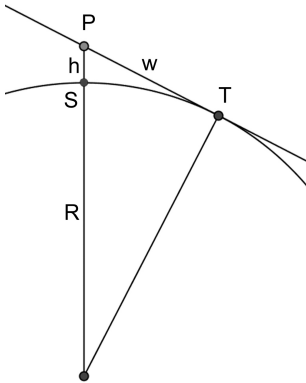


Abb. 3.9. Al-Birunis Bestimmung des Erdradius.

Setzt man den Erdradius mit R an und misst man die Weite als die Länge des Sehstrahls PT anstatt der Länge des Kreisbogens ST (der Unterschied ist winzig, wenn wir annehmen, dass die Höhe h des Turms klein gegenüber der Sichtweite $w = \overline{PT}$ ist), dann besagt der Satz des Pythagoras, dass

$$(R + h)^2 = R^2 + w^2$$

ist; Ausmultiplizieren ergibt

$$h(2R + h) = w^2.$$

Ist die Höhe klein gegenüber R , so wird $2R + h \approx 2R$ sein, folglich $2Rh \approx w^2$ und damit $R \approx \frac{w^2}{2h}$.

Sehr viele Sternennamen kommen aus dem Arabischen:

- Aldebaran ist ein Doppelstern im Sternbild Stier; der Hauptstern ist ein Roter Riese mit fast 1,2 Sonnenmassen, aber dem 145fachen Radius der Sonne. Er ist 67 Lichtjahre von uns entfernt.
- Algol ist ein veränderlicher Stern im Sternbild Perseus und etwa 90 Lichtjahre von uns entfernt. Er verändert seine Helligkeit mit einer Periode von 2,9 Tagen zwischen 2,1 und 3,4 m, was mit dem bloßen Auge beobachtet werden kann. Algol ist ein Bedeckungsveränderlicher: die Helligkeitsänderung wird dadurch verursacht, dass ein weniger heller Begleitstern sich vor den helleren Hauptstern schiebt.
- Beteigeuze ist der „oberste“ Stern im Orion. Er ist ein Roter Überriese (sein Radius beträgt etwa 1000 Sonnenradien), der in naher Zukunft zu einer Supernova werden wird. Er ist zwischen 500 und 750 Lichtjahre von uns entfernt.
- Deneb ist im Übergang von einem Blauen Riesen zu einem Roten Überriesen. Die deutsche Wikipedia-Seite gibt seine Entfernung mit 1411,96 Lj an (eine Genauigkeit mit 6 geltenden Ziffern ist schon ein Warnzeichen), die englische mit 2615 ± 215 Lj. Ein hinreichend genauer Wert scheint derzeit immer noch nicht bekannt zu sein.
- Rigel ist der hellste Stern im Orion (rechts unten). Er ist zwischen 650 und 900 Lichtjahre von uns entfernt. Der Hauptstern ist in der Übergangsphase von einem Blauen Riesen zum Roten Überriesen. Er hat die 46.000-fache Leuchtkraft der Sonne.
- Wega steht im Sternbild Leier; er ist nach Sirius und Arktur der dritthellste Stern auf der Nordhalbkugel und ist nur 25 Lichtjahre von der Erde entfernt. Vor 14.000 Jahren war die Wega der Polarstern.

Übungen

3.1 Schätze die Masse der Erde ab.

Wenn die Erde aus Stein bestehen würde, hätte sie eine Dichte von etwa $2,7 \text{ g/cm}^3$. Bei einem Radius von 6370 km kommt man so auf eine Masse von $3 \cdot 10^{24} \text{ kg}$. Weil die Erde ein Magnetfeld besitzt, dürfen wir annehmen, dass der Kern aus Eisen besteht, das eine Dichte von fast 8 g/cm^3 hat. Die Erdmasse wird also, je nach Größe des Kerns, um einen Faktor von etwa 2 größer sein.

3.2 Wie weit sieht eine Person mit Augenhöhe am Meeresufer auf den Horizont hinaus?

3.3 Wie weit ist ein Leuchtturm mit 80 m Höhe zu sehen?

3.4 Bis zu welcher Entfernung von der Erde kann diese die Sonne vollständig bedecken?

Bezeichnen D und d die Durchmesser von Sonne und Erde, so gilt für die Entfernung s (in km) von der Erde, bis zu der es einen Kernschatten gibt, nach dem Strahlensatz $s : d = (s + 1,5 \cdot 10^8) : D$. Daraus folgt

$$s = \frac{d}{D-d} \cdot 1,5 \cdot 10^8.$$

Mit $D = 1,4 \cdot 10^6$ km und $d = 1,3 \cdot 10^4$ km folgt daraus $s = 1,4 \cdot 10^6$ km.

4. Von Kopernikus bis Kepler

Der griechische Philosoph Aristoteles wurde von der Kirche schon früh zu ihrem Kronzeugen gemacht. Aristoteles hatte in seiner Physik argumentiert, es müsse eine Kraft geben, die alle Bewegung auf der Welt verursacht, und nannte sie den „unbewegten Beweger“. Thomas von Aquin (1225–1274) identifizierte diesen kurzerhand mit dem christlichen Gott. Dies führte im Laufe der Zeit dazu, dass die Lehre des Aristoteles (und deren Interpretation durch die Kirche) als unumstößliche Wahrheit galt. Gegner der aristotelischen Scholastik waren etwa Petrus Ramus (Pierre de la Ramée, 1515–1572) und Francis Bacon (1561–1626). Ramus wurde 1572 in der Bartholomäusnacht ermordet – in dieser Nacht wurden in Paris und ganz Frankreich Tausende Hugenotten (Protestanten) abgeschlachtet; Papst Gregor XIII. ließ zur Feier des Tages ein Te Deum singen und eine Gedenkmünze prägen.

Als Francis Bacon meinte, das menschliche Wissen sei kumulativ und würde im Laufe der Zeit zunehmen, stellte er sich bereits gegen die kirchliche Lehre, wonach alles, was der Mensch wissen könne, bereits in der heiligen Schrift und bei Aristoteles stehe.

Giordano Bruno erregte mit seinen 120 Thesen gegen die aristotelische Naturlehre Tumulte. 1592 wurde er von der Inquisition verhaftet und nach Rom gebracht. Nach 8 Jahren Kerkerhaft wurde er am 17. Februar 1600 wegen Ketzerei auf dem Scheiterhaufen verbrannt.

4.1 Kopernikus

- Video Gassner Kopernikus bis Kepler

Probleme des geozentrischen Weltbilds:

- Warum stehen Merkur und Venus immer in der Nähe der Sonne?
- Schleifenbewegung der Planeten, insbesondere des Mars
- Die Helligkeit der Planeten kann nur von ihrer Entfernung zur Sonne abhängen, während sie in Wirklichkeit auch von der Entfernung zur Erde abhängt.

Probleme des heliozentrischen Weltbilds:

- Die fehlende Parallaxe der Sterne.

Der Abstand von Venus und Sonne

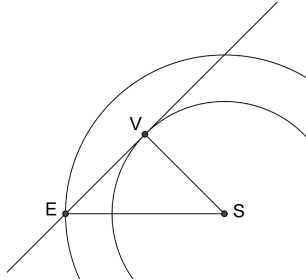
Bevor wir den Abstand von Venus und Sonne abschätzen, wollen wir uns fragen, wie lange ein Sonnenuntergang am 21. März am Äquator dauert.

Die Sonne hat (wie der Mond) einen Winkeldurchmesser von $0,5^\circ$. In 24 h dreht sie sich scheinbar um die Erde, hat also eine Winkelgeschwindigkeit von $\frac{360^\circ}{24h} = 15^\circ/h$. Wenn sie also im Westen senkrecht untergeht, braucht sie dafür $\frac{0,5^\circ}{15^\circ/h} = \frac{1}{30}h$, also etwa 2 Minuten.

In unseren Breitengraden dauert ein Sonnenuntergang länger, weil diese nicht senkrecht auf den Horizont zuläuft, aber auch hier ist die Sonne nach vier Minuten untergegangen. Allerdings ist der obere Rand der Sonne selbst dann noch zu sehen, wenn die Sonne bereits komplett untergegangen ist: dies liegt an der Lichtbrechung in der Atmosphäre (Refraktion).

1. Der Abstand ist in Astronomischen Einheiten anzugeben; das ist die mittlere Entfernung von der Erde zur Sonne (also $1 \text{ AE} \approx 149,6 \text{ Mio km}$, aber das tut hier nichts zur Sache).

2. Die Venus heißt deswegen Morgen- bzw. Abendstern, weil sie entweder morgens vor der Sonne aufgeht oder abends nach ihr untergeht, während Mars manchmal auch bei Mitternacht zu sehen ist. Das liegt daran, dass die Umlaufbahn der Venus innerhalb der Erdbahn verläuft.



Die wesentliche Information ist dann, dass die Venus maximal drei Stunden vor der Sonne auf- bzw. maximal drei Stunden nach ihr untergeht.

Aus dieser Zeitangabe kann man den Winkel der maximalen Auslenkung der Venus zu 45° ermitteln. Daher ist das rechtwinklige (Tangenten an Kreise stehen senkrecht auf den Radius) Dreieck EVS gleichschenkelig, d.h. es ist $\overline{EV} = \overline{SV}$. Also ist \overline{ES} die Diagonale eines Quadrats mit Seitenlänge \overline{VS} , d.h. $\overline{ES} = \sqrt{2} \cdot \overline{VS}$. Da \overline{VE} eine Astronomische Einheit ist, folgt für die Entfernung Venus-Sonne $\overline{VS} \approx 0,7 \text{ AE}$ wegen $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7$.

Bei dieser Abschätzung haben wir natürlich einige vereinfachende Annahmen gemacht, die allesamt das Ergebnis nicht allzu sehr verfälschen. Insbesondere haben wir angenommen, dass Erde und Venus sich auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen, die in derselben Ebene liegen. Dass die Bahnebenen in Wirklichkeit gegeneinander geneigt sind erkennt man daran, dass die Venus, würde ihre Bahnebene mit derjenigen der Erde zusammenfallen, alle 584 Tage vor der Sonne vorbeiziehen müsste. Tatsächlich ist ein „Venustransit“ äußerst selten: Der letzte war im Juni 2012, den nächsten kann man erst wieder am 11.12.2117 beobachten.

Für die Abschätzung der Entfernung von Merkur und Sonne benötigt man schon etwas Trigonometrie; natürlich kann man damit umgekehrt aus dem Abstand die maximale Zeit berechnen, um welche Merkur der Sonne voraus- bzw. hinterherläuft. Allerdings ergeben sich aus der Elliptizität der Merkurbahn und ihrer Neigung gegenüber der Ekliptik viel größere Schwankungen als bei der Venus.

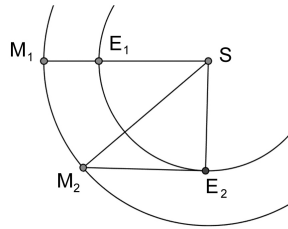
Der Abstand von Mars und Sonne

Oben haben wir gesehen, wie man mit ganz einfachen Beobachtungen die Entfernung der Venus von der Sonne (in Astronomischen Einheiten – das ist die durchschnittliche Entfernung von Erde und Sonne) bestimmen kann. Beim Mars ist das ähnlich leicht.

An einem bestimmten Tag steht der Mars um Mitternacht an der Stelle, an der mittags die Sonne gestanden hat (man sagt, Mars sei in Opposition). Ein Viertel Jahr später geht der Mars um Mitternacht gerade am Horizont auf (man spricht von der Quadratur). Die Umlaufdauer des Mars um die Sonne beträgt etwa zwei Jahre.

Bestimme daraus die Entfernung des Mars von der Sonne.

Dazu betrachten wir folgende Skizze: In einem Vierteljahr dreht sich die Erde um $\sphericalangle M_1SE_2 = 90^\circ$; im gleichen Zeitraum dreht sich der Mars, dessen Umlaufdauer etwa zwei Jahre sind, um etwa 45° . Also muss das Dreieck M_2ES ein gleichschenkliges rechtwinkliges Dreieck sein, was auf $\overline{M_2S}^2 = 2\overline{ES}^2$ führt. Also ist der Mars etwa 1,4-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde.



In Wirklichkeit verstreichen zwischen Opposition und Quadratur des Mars 104 Tage, und die Umlaufdauer des Mars beträgt 687 Tage. Das führt auf $\sphericalangle M_1SE_2 = 103^\circ$ und $\sphericalangle M_1SM_2 = \frac{104}{687} \cdot 360^\circ \approx 55^\circ$, was mit $\sphericalangle M_2SE_2 \approx 48^\circ$ und etwas Trigonometrie auf eine Entfernung von 1,5 AE führt.

4.2 Galilei

Galileo Galilei (1564–1641/42) gilt als der neuzeitliche Vater der Physik: konsequent stellt er das Experiment (und nicht mehr Aristoteles) als die höchste Autorität der Wissenschaft ins Zentrum. Er findet heraus, dass die Falldauer eines Körpers nicht von seiner Masse abhängt und versucht (erfolglos), die Lichtgeschwindigkeit zu messen.

Als er von der Erfindung des Fernrohrs hört, baut er sich selbst eines und richtet es auf den Himmel, insbesondere auf den Mond und die bekannten Planeten.

Galilei entdeckt vier Monde des Jupiter. Dies sind die ersten Himmelskörper, die nachweislich nicht um die Erde kreisen. Galilei entdeckt die Phasen der Venus, die zeigen, dass die Venus um die Sonne und nicht um die Erde kreist. In der Folge übernimmt er das kopernikanische Weltbild.

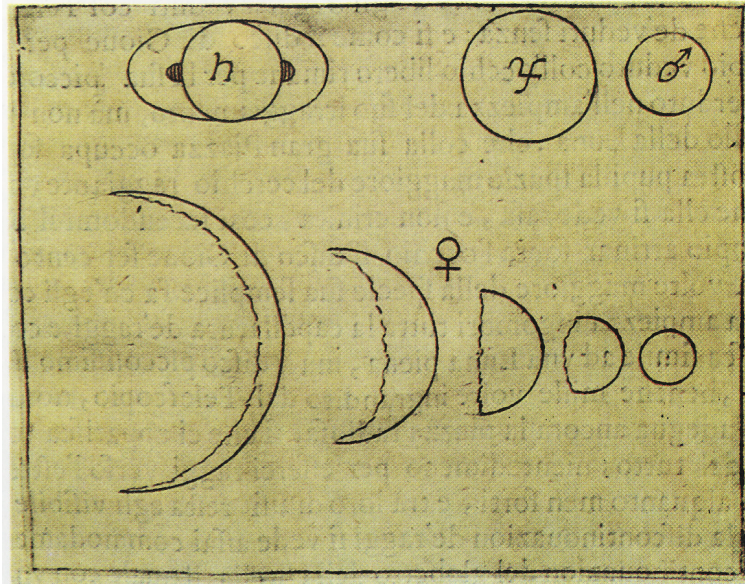


Abb. 4.1. Galileis Phasen der Venus und die „Henkel“ des Saturn

1632 kommt er vor die Inquisition; er muss seine Lehren als Irrtum bezeichnen und entgeht damit dem Scheiterhaufen. Von 1633 bis zu seinem Tod wird er unter Hausarrest gestellt.

Simon Marius

Simon Marius (latinisiert für Simon Mayr) wurde 1573 in Gunzenhausen geboren, war dann fürstlicher Hofastronom in Ansbach, wo er 1624/25 gestorben ist. Mit einem Teleskop entdeckte er einen Tag nach Galilei die vier Monde des Jupiter. Galilei reagiert mit Plagiatsvorwürfen (Marius hatte den Julianischen Kalender benutzt, wonach er die Monde am 29. Dezember 1609 entdeckt hat; Galilei machte seine Entdeckung am 7. Januar 1610, einen Tag vor Marius).

Marius übernahm das Weltbild von Tycho Brahe, wonach die Erde im Zentrum steht, aber Merkur und Venus um die Sonne kreisen.

4.3 Kepler

Kepler hat die damals äußerst genauen Beobachtungen von Tycho Brahe (1546–1601) benutzt, um auf diese Weise die Entfernung von Sonne und Mars an vielen Punkten seiner Bahn zu berechnen; das hat ihn schließlich zur Erkenntnis geführt (das erste Keplersche Gesetz), dass die Marsbahn eine Ellipse ist, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet.

Tycho Brahe hat seine Beobachtungen noch ohne Fernrohr gemacht – der Erste, der das neu erfundene Teleskop auf den Himmel richtete, war Galilei (1564–1641/42), der damit 1610 die Monde des Jupiters entdeckte; schon eine Nacht später hat sie der Ansbacher Hofastronom Simon Marius (1573–1624) aus Gunzenhausen ebenfalls entdeckt. Damit war die Vorstellung *ad absurdum* geführt, die Planeten würden sich auf Kristallsphären um die Erde bewegen, und es war zweifelsfrei bewiesen, dass sich nicht alle Himmelskörper um die Erde drehen. Galilei befürwortete das heliozentrische Weltbild von Kopernikus (1473–1543) und wurde dafür 1633 von Rom unter Hausarrest gestellt; das Urteil wurde 1992 von Papst Johannes Paul II aufgehoben.

Johannes Kepler wurde am 27. Dezember 1571 in Weil der Stadt geboren. Sein Vater war Legionär und starb vermutlich in den Niederlanden; der kleine Kepler hat ihn mit fünf Jahren zuletzt gesehen. Während seines Studiums in Tübingen lernte er das damals vorherrschende geozentrische Weltbild kennen, in welchem die Sonne und alle Planeten um die Erde kreisen. Kepler wurde später Assistent Tycho Brahes in Prag, und widmete sich nach dessen Tod im Jahre 1601 der Bestimmung der Marsbahn; von seinen Berechnungen sind fast 1000 Seiten noch erhalten. Kepler starb am 15. November 1630 in Regensburg; da er Protestant war, wurde er außerhalb der Stadtmauern begraben.

Die Keplerschen Gesetze

Durch sein genaues Studium der Marsbahn wird Kepler auf drei Gesetze geführt, welche die Bewegungen der Planeten erstmals in der Geschichte der Menschheit quantitativ zufriedenstellend beschreiben.

1. Keplersches Gesetz: Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Keplersches Gesetz: Der von der Sonne zu einem Planeten gezogene Fahrstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Keplersches Gesetz: Die Quadrate der siderischen Umlaufdauern der Planeten sind proportional zu den dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen.

Hier sind einige Begriffe aufzuklären.

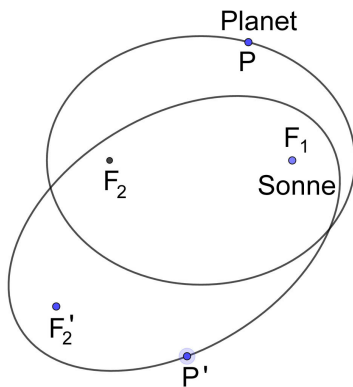


Abb. 4.2. Ellipsenbahnen zweier Planeten P und P' um die Sonne, die im Brennpunkt F_1 beider Bahnen steht.

Kegelschnitte

Ellipsen sind geometrische Kurven, die zur Familie der Kegelschnitte gehören. Kegelschnitte sind Kurven, welche entstehen, wenn man einen (doppelseitigen) Kegel mit einer Ebene schneidet. Dazu gehören Kreise, Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln.

So wie der Kreis aus allen Punkten besteht, welche von einem Punkt M (dem Mittelpunkt) denselben Abstand (den Radius) haben, ist die Ellipse die Menge aller Punkte, deren Abstände zu zwei gegebenen Punkten (den beiden Brennpunkten) die gleiche Summe haben.

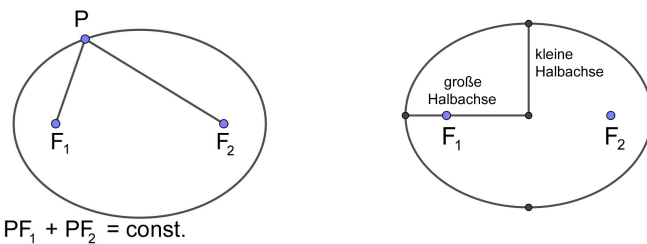


Abb. 4.3. Definition der Ellipse; große und kleine Halbachse

Bei einem Kreis gibt es nur einen Radius; bei einer Ellipse gibt es dagegen eine große Halbachse (die Hälfte des größten Durchmessers; dieser geht durch die beiden Brennpunkte) und eine kleine Halbachse. Je unterschiedlicher große und kleine Halbachse sind, um so plattgedrückter erscheint die Ellipse. Man definiert die Exzentrizität als Maß für die Abweichung von einem Kreis durch

$$e = \frac{R - r}{R + r},$$

wo R und r der größte bzw. der kleinste Abstand der Bahn zum Zentralkörper im Brennpunkt ist. Beachte, dass $R + r = 2a$ ist, wenn a die große Halbachse bezeichnet. Die Exzentrizität eines Kreises (dort ist $R = r$) ist also 0, und für $R/r \rightarrow \infty$ geht die Exzentrizität gegen 1.

Die Gerade durch die beiden Brennpunkte einer Ellipse nennt man auch die Apsidenlinie. Der Punkt der Bahn, der dem Brennpunkt, in dem die Zentralmasse steht, am nächsten ist, heißt Periapsis, der Punkt welcher der Zentralmasse am fernsten ist, Apoapsis. Ist die Zentralmasse die Sonne, spricht man von Perihel und Aphel, im Falle der Erde von Perigäum und Apogäum.

Die Einführung von Ellipsen als Bahnkurven ist eine drastische Abkehr von der Lehre des Aristoteles, wonach alles am Himmel perfekt sei; insbesondere waren die Anhänger der aristotelischen Lehre davon überzeugt, dass es am Himmel nur kugelförmige Objekte und Kreisbahnen gibt.

Rechnungen mit den Keplerschen Gesetzen

Durch Beobachtung der Planeten kann man deren synodische Umlaufdauern bestimmen und daraus die siderischen Umlaufzeiten berechnen. Mit Hilfe der Keplerschen Gesetze kann man damit die großen Halbachsen derjenigen Planetenbahnen bestimmen, die sich direkt nur schwer messen lassen.

Planet	Halbachse	Umlaufdauer
Merkur	0,39	0,241
Venus	0,72	0,616
Erde	1	1
Mars	1,52	1,9
Jupiter	5,2	11,9
Saturn	9,54	29,5
Uranus	19,18	84
Neptun	30,06	165

Hierbei sind Entfernungen in Astronomischen Einheiten (Entfernung Erde-Sonne) und Jahren (Umlaufdauer der Erde) angegeben.

Die Beziehung $a^2 = T^3$, wenn Entfernungen in Astronomischen Einheiten und T in Jahren gemessen wird, liefert für die Venus eine große Halbachse $a \approx \sqrt[3]{0,616^2} \approx 0,72$; für Jupiter erhält man $a \approx \sqrt[3]{11,9^2} \approx 5,2$.

Die relativ regelmäßige Zunahme der Halbachsen der Planeten haben die deutschen Astronomen Titius und Bode auf eine einfache Formel gebracht: in astronomischen Einheiten gilt

$$a_n = 0,3 + 0,4 \cdot 2^n,$$

wobei für Merkur $n = -\infty$ (also $2^{-\infty} = 0$) genommen werden muss, und die Planeten Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn den Werten $n = 0, 1, 2, 4$ und

5 entsprechen. In der großen Lücke zwischen Mars und Jupiter befindet sich der später entdeckte Asteroidengürtel.

4.4 Nachweise der Bewegung

Mit welchen Methoden lässt sich die Bewegung der Erde nachweisen? Am überzeugendsten gelingt der Nachweis der Rotation durch den Pendelversuch des französischen Physikers Foucault. Dieser beobachtete im Januar 1851 ein 2 m langes Pendel und stellte fest, dass sich die Schwingungsebene langsam änderte. Er erklärte dies korrekt durch die Erdrotation. Zwei Monate später führte er das Experiment öffentlich im Pantheon mit einem 67 m langen Pendel vor.

- Video [Foucault](#)

Auch Galilei konnte mit Hilfe seines Fernrohrs nachweisen, dass das geozentrische System nicht richtig sein konnte: Die Venus durchlief Phasen wie der Mond; eine volle Scheibe konnte sie im geozentrischen Weltbild nicht haben, weil die Venus darin immer zwischen Sonne und Erde steht und nie dahinter.

Rømer und die Lichtgeschwindigkeit

Ole Rømer (1644–1710) studierte Astronomie in Kopenhagen und wurde vom französischen Astronomen Giovanni Cassini bei dessen Besuch in Kopenhagen nach Paris eingeladen. Galileis Entdeckung der Monde Jupiters erlaubten die Bestimmung der Zeit durch die Beobachtung der Jupitermonde. So konnten zwei Beobachter an verschiedenen Orten ihre Uhren synchronisieren, indem sie gleichzeitig die Verfinsterung eines Jupitermonds beobachteten. Die Bahnen dieser Monde wurden daher sehr genau untersucht, und es dauerte nicht lange, bis man feststellte, dass sich die Bahnen nicht an die Berechnungen hielten. Die Abweichung, so fand man heraus, hing von der scheinbaren Größe der Jupiterscheibe ab, also von der Entfernung des Jupiter von der Erde.

Rømer vermutete, dass die etwa 10-minütige Verspätung der Monde bei Erdferne an der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit liegt: Das Licht der Monde muss ja einen weiteren Weg zurücklegen, wenn die Erde weiter entfernt ist.

Cassini selbst hat sich dieser Deutung nicht angeschlossen, und zwar deshalb, weil sie nicht bei allen vier Monden zu funktionieren schien. Probleme, die mit der Exzentrizität der Bahn des Jupiters und seiner Monde zusammenhingen, wurden erst später zufriedenstellend gelöst. Huygens hat Rømers Ergebnis akzeptiert und aus astronomischen Daten die Lichtgeschwindigkeit zu etwa 230.000 km/s bestimmt (natürlich in anderen Einheiten: 48.203 französische lieues communes (eine lieue commune ist 1/25 des Erdumfangs entlang des Äquators, also 4,452 km); der korrekte Wert ist 299.792 km/s).

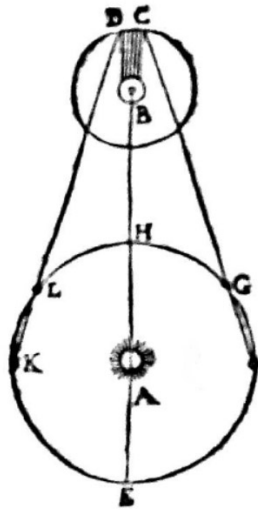


Abb. 4.4. Rømers Zeichnung aus seiner Abhandlung

Aberration des Lichts

Der englische Astronom James Bradley (1693–1762) war einer von vielen, die sich an der Bestimmung der Parallaxe von Sternen versucht haben. Er hat auch tatsächlich eine Bewegung der Sternennorte über ein Jahr hinweg gemessen, allerdings war ihm schnell klar, dass dies keine Parallaxe sein konnte: Wenn die Erde auf einer Seite der Bahn ist, sollte die Abweichung des Sterns auf der anderen Seite sein, und das war nicht der Fall; vielmehr war die Abweichungsellipse um ein Vierteljahr gedreht.

Nach langem Nachdenken fand er auch den Grund seiner Beobachtung: Der von ihm gemessene Effekt liegt an der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit und an der Bewegung der Erde um die Sonne. Physikalisch steckt dasselbe Prinzip dahinter wie in folgendem Beispiel: geht man im senkrecht von oben fallenden Regen zügig vorwärts, muss man den Regenschirm neigen, damit man nicht nass wird. Dasselbe passiert bei Teleskopen: Weil sich das Licht mit endlicher Geschwindigkeit durch das meterlange Teleskop bewegt, muss man das Teleskop leicht neigen. Die scheinbare Kreisbahn des Sterns hat dabei einen Winkeldurchmesser von etwa 41 Bogensekunden.

Bradley hatte damit tatsächlich einen Beweis für die Bewegung der Erde um die Sonne gefunden, und gleichzeitig gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist. Aus der Formel $\tan \alpha = \frac{v}{c}$, wo $\alpha \approx 20,5''$ der Winkelradius der scheinbaren Sternbahn und v die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne ist, lässt eine Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zu.

Die Erklärung Bradleys funktionierte übrigens nur mit dem Teilchenmodell des Lichts; auch der Äther (ein hypothetisches Medium, in welchem sich das Licht ausbreiten sollte, das aber – wie heute die dunkle Materie – niemand jemals hat

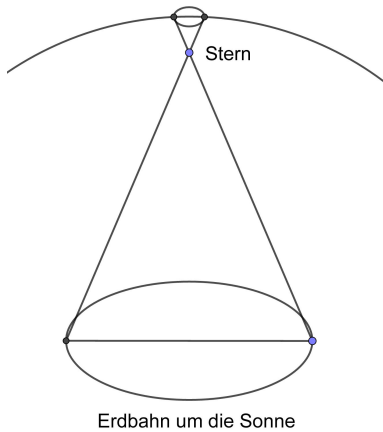


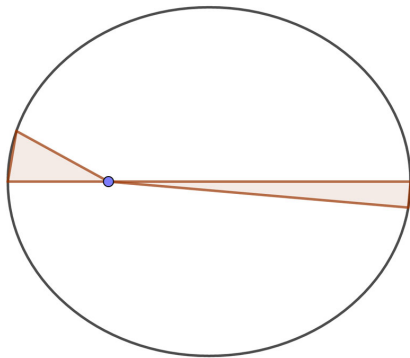
Abb. 4.5. Parallaxe eines Sterns an der Himmelskugel

messen können) machte Probleme. Eine vollkommen zufriedenstellende Erklärung hat erst Einstein mit seiner speziellen Relativitätstheorie geben können.

Übungen

- 4.1 Wie verändert sich die Umlaufdauer eines Planeten, wenn sich sein Abstand verdoppelt bzw. verdreifacht?
- 4.2 Neptun braucht 165 Jahre für einen Umlauf um die Sonne. Wie viele Astronomische Einheiten ist er von der Sonne entfernt? Wie lange braucht das Licht von der Sonne, um ihn zu erreichen?
- 4.3 Der Jupiter hat eine Umlaufdauer von 11,86 Jahren. Bestimme daraus seine Entfernung von der Sonne (in AE). Wie nahe kann er der Erde kommen, wie weit ist er höchstens von ihr weg?
- 4.4 Phobos und Deimos sind die beiden Monde des Mars; mit Durchmessern von unter 25 km sind es eher Gesteinsbrocken.
Phobos umreist den Mars in einer Entfernung von 9400 km in 7,7 Stunden, Deimos braucht für einen Umlauf 30,3 Stunden. Wie weit ist Deimos vom Mars entfernt?
- 4.5 Ein Asteroid kommt der Sonne bis auf 2 AE nahe und ist auf seinem sonnenfernsten Punkt bis zu 4 AE von ihr weg.
Bestimme die große Halbachse der Bahn, sowie die Umlaufdauer.
- 4.6 Der Halleysche Komet hat eine Umlaufdauer von 76 Jahren, und ist im fernsten Punkt seiner Bahn 35,3 AE von der Sonne entfernt.
Wie nahe kommt er der Sonne?

- 4.7 Sedna ist ein sehr weit entfernter Kleinplanet, der 2003 entdeckt wurde. In seinem fernsten Punkt ist er 937 AE von der Sonne entfernt, in seinem nächsten 76 AE. Berechne seine Umlaufdauer.
- 4.8 Der Komet Encke hat eine Umlaufdauer von nur 3,3 Jahren. Bestimme seine große Halbachse.
Die kürzeste Entfernung zur Sonne beträgt 0,34 AE. Welche Entfernung hat er in Sonnenferne?
- 4.9 ([16, 1.2.2]) Vom Kometen 18431 kennt man die Exzentrizität $e = 0,99991$ und die Periheldistanz $q = 0,0055$ AE. Geben Sie die Periheldistanz in Kilometern an. Berechnen Sie die große Halbachse der Bahn, die Apheldistanz und die Umlaufzeit.
- 4.10 ([16, 1.2.3]) Um welchen Betrag müsste sich die Masse der Sonne ändern, damit bei gleichbleibendem mittleren Abstand Sonne-Erde das Jahr um a) 1 s, b) 1 d länger oder kürzer würde?
- 4.11 (Abitur Bayern, 1988)
Die Bahnen von Venus und Erde seien im Folgenden als Kreise in derselben Ebene angenommen.
Zur möglichst genauen Bestimmung der Astronomischen Einheit sendet man zum Zeitpunkt der unteren Konjunktion ein Radarsignal zur Venus, welches dort reflektiert und 4 min 36,3 s nach dem Aussenden wieder auf der Erde registriert wird.
Berechnen Sie die Entfernung d Venus-Erde zu diesem Zeitpunkt. (Ergebnis: $d = 4,14 \cdot 10^{10}$ m).
Bestimmen Sie nun mit den gegebenen siderischen Umlaufzeiten von Erde (1 a) und Venus (0,615 a) und der Entfernung d die Größe 1 AE in Metern.
- 4.12 Der Merkur hat eine große Halbachse von 0,39 AE und eine Bahn mit der Exzentrizität $e = 0,2056$. Bestimme die Perihel- und Aphel-Distanz.
Es ist $R + r = 2a = 0,78$ AE und $R - r = e(R + r) = 0,2056 \cdot 0,78$ AE, also $R - r \approx 0,1604$ AE. Daraus erhält man $R = 0,47$ AE und $r = 0,31$ AE.
- 4.13 Bestimme das Verhältnis der Geschwindigkeiten eines Satelliten im Apogäum zu derjenigen im Perigäum, wenn die Entfernung im Apogäum doppelt so groß ist wie die im Perigäum.



Der Fahrstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen. Für sehr kleine Dreiecke ist die Höhe näherungsweise gleich dem Abstand zur Erde; bezeichnet also p die Entfernung des Satelliten von der Erde im Perigäum und a diejenige im Apogäum, dann haben die beiden Dreiecke die Höhen p und $a = 2p$. Die Grundseiten der Dreiecke haben die Länge $v \cdot \Delta t$. Gleichheit der Flächen ergibt also

$$1 = \frac{\frac{1}{2}pv_p\Delta t}{\frac{1}{2}av_a\Delta t} = \frac{pv_p}{av_a},$$

und daraus folgt $v_p : v_a = a : p = 2 : 1$.

Die Geschwindigkeit im Perigäum ist also doppelt so hoch wie im Apogäum.