

Kapitel 1

Astronomie

Das folgende Kapitel zum Thema Astronomie basiert auf das Skript von Dr.Olivier Eicher (Physik- und Mathematiklehrer am Gymnasium und Fachmittelschule Thun).

K A P I T E L Z I E L E :

- Sie kennen die Unterschiede zwischen dem geozentrischen und heliozentrischen Weltbild und können für das heliozentrische Weltbild wissenschaftlich argumentieren.
- Sie können mit den 3 Keplergesetzen umgehen und mit dem dritten Rechnungen anstellen.
- Sie kennen das Gravitationsgesetz und können die Formel konkret auf Aufgaben anwenden.
- Sie können erklären, wie Mond- und Sonnenfinsternis entstehen.

1.1 Die Entwicklung der Weltbilder

Im Jahre 1665 erkannte Newton, dass die Schwerkraft der Erde ein Spezialfall der allgemeinen Gravitationsanziehung ist, die zwischen beliebigen Körpern herrscht. Er vermochte sogar an der Bewegung der Planeten das Kraftgesetz abzulesen, durch welches diese Wechselwirkung beschrieben wird. Damit war zugleich gezeigt, dass die physikalischen Gesetze nicht nur auf der Erde Gültigkeit haben, sondern dass auch die Himmelskörper diesen Gesetzen unterworfen sind. Dies hatte weitreichende Folgen. Die Bewegung der Planeten, der Monde und der Kometen wurde verständlich, und ihr zukünftiger Lauf liess sich vorhersagen. Auch war es möglich, Ebbe und Flut und viele andere bis dahin unverständliche Erscheinungen zu erklären. Newton vermochte seine bahnbrechenden Erfolge allerdings nur zu erreichen, weil er auf den Ergebnissen grosser Forscher früherer Zeiten aufbauen konnte (in seinen eigenen Worten: "If I have seen further it is by standing on the shoulders of giants"). Wir müssen daher zunächst über die Arbeiten seiner Vorgänger berichten. In Abbildung 1.1 sind die bedeutende Veröffentlichungen für die Entwicklung des Weltbilds dargestellt.

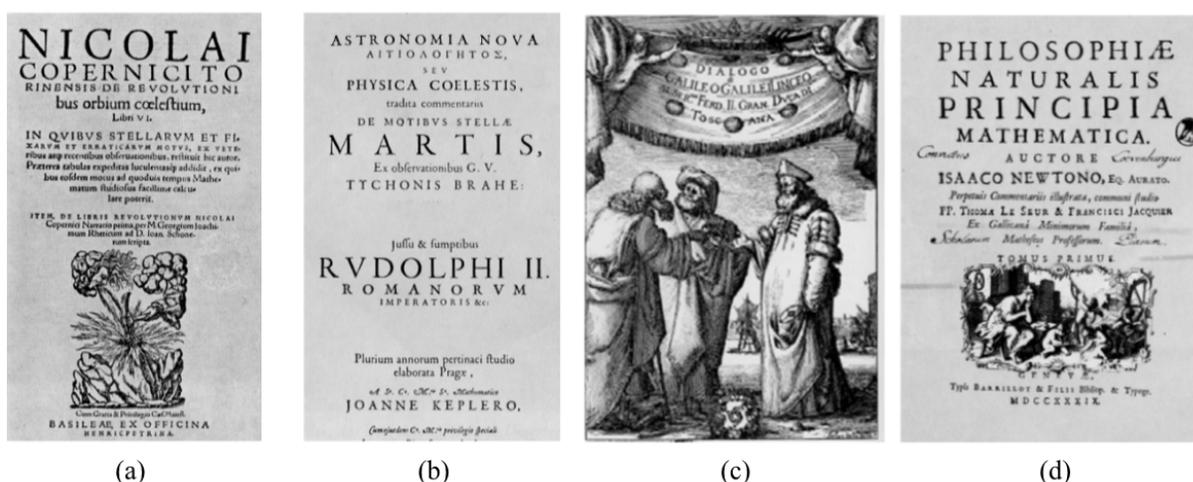


Abbildung 1.1: (a) 1543 erscheint Kopernikus' Werk "Über die Bewegung der Himmelskörper". (b) 1605 überreicht Kepler in Prag Kaiser Rudolf II "Die neue Astronomie". (c) 1632 vollendet Galilei seinen "Dialog über zwei neue Wissenschaften". Ein halbes Jahr später wird es von der Kirche verboten. (d) 1687 erscheint in London Newtons Buch "Mathematische Prinzipien der Naturlehre" in der ersten Auflage.

Wir wissen nicht, wer die Sterne erstmals in Gruppen zusammengefasst hat. Unsere heutigen Sternbilder¹ leiten sich zumeist von den griechischen Einteilungen ab. Wir wissen auch nicht, wem als erstes aufgefallen ist, dass am Himmelsgewölbe zwischen den zahllosen Fixsternen fünf Planeten – Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn – einherziehen.

Es gilt aber als sicher, dass diese Entdeckung bereits im frühesten Altertum erfolgt ist. Die Griechen unternahmen die ersten Versuche, die Fülle der astronomischen Beobachtungen mit einer einheitlichen Theorie zu verknüpfen, und von den Griechen stammt auch das erste widerspruchsfreie Weltbild. Es wurde fast 2'000 Jahre lang als richtig angesehen.

1.1.1 Das geozentrische Weltbild

1.1.1.1 Aristoteles (384 v.Chr. – 322 v.Chr.)

Bereits früh wurde vermutet, dass die Erde kugelförmig ist. Aristoteles lieferte einen eleganten Beweis für die Kugelgestalt der Erde. Er wies darauf hin, dass der Rand des Erdschattens, der während einer Mondfinsternis auf dem Mond sichtbar wird, immer ein genauer Kreisbogen ist (siehe Abbildung 1.2).

¹Input: Die Einteilung in die Sternbilder ist mit einem interessanten perspektivischen Problem im dreidimensionalen Raum behaftet. So befinden sich z.B. im Sternbild Fische die beiden Sterne Kullat Nunu und Alrischa, die von uns aus gesehen zum selben Sternbild gehören. Ersterer ist 294 LJ entfernt, Alrischa 139 LJ. Also sind wir näher an Alrischa als Alrischa an Kullat Nunu. Die Einteilung würde also von anderen Orten im Universum völlig anders aussehen.

Während einer Mondfinsternis wirkt der Mond wie eine riesige Leinwand, die hoch im Himmel aufgespannt ist, und wenn der Erdschatten auf diese fällt, enthüllt unser Planet seine Kugelgestalt. Jedes Mal wenn sich die Erde auf den Mond projiziert, hat der Erdschatten immer die Form einer Kreisscheibe. Daraus schloss Aristoteles, dass die Erde eine Kugel sein muss. Denn unter allen möglichen geometrischen Körpern (Würfel, Zylinder, usw.) ist es nur die Kugel, die in jeder Stellung immer einen kreisförmigen Schatten wirft.



Abbildung 1.2: Illustration des Beweises, dass die Erde eine Kugel ist. Aristoteles wies darauf hin, dass der Rand des Erdschattens, der während einer Mondfinsternis auf dem Mond sichtbar wird, immer ein genauer Kreisbogen ist.

Aristoteles war überzeugt, dass sich die Welt, die doch göttlichen Ursprungs war, durch höchste Vollkommenheit auszeichnen muss. Weil die Kugel von allen Körpern die "vollkommenste" Form besitzt und schon die Erde annähernd kugelförmig ist, war es für Aristoteles selbstverständlich, dass die Himmelskörper exakte Kugeln sein müssen, die sich nur auf Kreisen, den Kurven höchster Vollkommenheit, in vollendeter Regelmässigkeit bewegen können.

1.1.1.2 Ptolemäus (etwa 90 n.Chr. – 160 n.Chr.)

Grosse Schwierigkeiten machte den antiken Astronomen die Beschreibung der Planetenbewegung. Die Planeten bewegen sich nämlich nicht so wie Sonne und Mond fast gleichmässig über den Himmel, sondern laufen bald schneller und bald langsamer. Manchmal werden sie in ihrer Bewegung sogar "rückläufig", so dass ihre Bahnen am Himmel komplizierte Kurven und Schleifen bilden (siehe Abbildung 1.3). Nebenstehend ist ein Stück der scheinbaren – so wie wir sie von der Erde aus sehen – Marsbahn abgebildet. Zwischen dem 1. Dezember 1960 und dem 1. Februar 1961 war der Planet "rückläufig". Dieses Verhalten stand in Gegensatz zu der von Aristoteles geprägten These von der gleichförmigen Kreisbewegung und machte seinen Anhängern schwer zu schaffen. Hier fand nun Ptolemäus eine Möglichkeit, die ungleichmässige Bewegung der Planeten mit der aristotelischen Lehre von der gleichförmigen Kreisbewegung in Einklang zu bringen. Danach durchläuft der Planet einen kleinen Kreis, einen sogenannten Epizykel, dessen Mittelpunkt sich auf einem grossen Kreis, dem Deferenten, um die ruhende Erde bewegt.

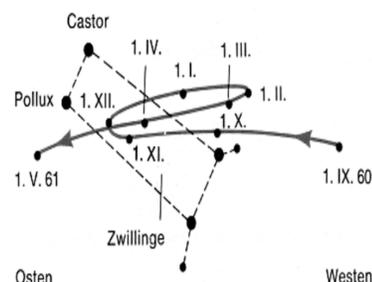


Abbildung 1.3: Ein Stück von der Marsbahn, betrachtet von der Erde. Die Planetenbahnen bilden komplizierte Kurven und Schleifen.

Läuft der Planet im Epizykel in der gleichen Richtung wie der Epizykel auf dem Deferenten, so verstärken sich die beiden Bewegungen, und es hat den Anschein, als liefe der Planet sehr rasch. Läuft dagegen der Planet im Epizykel in der entgegengesetzten Richtung, so scheint der Planet am Himmel zurückzulaufen. Die ungleichmässige Schleifenbewegung des Planeten wird so auf die Überlagerung zweier gleichförmiger Kreisbewegungen zurückgeführt. Reichen zwei solche Bewegungen nicht aus, um Übereinstimmung mit den Messungen herzustellen, so werden weitere Kreisbewegungen zu Hilfe genommen. Auf diese Weise konnte Ptolemäus alle Bewegungen am Himmel beschreiben. In seinem berühmten Buch "Almagest", das nur in einer arabischen Übersetzung erhalten ist, hat Ptolemäus dieses Weltbild ausführlich dargestellt (siehe Unterkapitel 1.1.1.3).

1.1.1.3 Das ptolemäische, geozentrische Weltbild

- Die Erde steht im Mittelpunkt der Welt. Sie ist gegenüber dem Radius des Himmelsgewölbes punktförmig klein.
- Das kugelförmige Himmelsgewölbe dreht sich mit den daran befestigten Sternen von Osten nach Westen täglich einmal um die Erde. Sonne, Mond und Planeten machen diese Bewegung mit. Sie führen aber ausserdem noch weitere Bewegungen aus.

- Die Sonne umkreist in einem Jahr die Erde.
- Die Kreisbahnebene der Sonne heisst Ekliptik. Die Ekliptik–Normale schliesst mit der Rotationsachse des Himmelsgewölbes einen Winkel von 23.5° ein und macht den täglichen Umlauf des Himmelsgewölbes mit.
- Mond und Planeten bewegen sich in der Ekliptik.
- Der Mond läuft auf einer Kreisbahn um die Erde.
- Die Planeten bewegen sich auf kleinen Kreisen (Epizykeln), deren Mittelpunkte wiederum auf Kreisen (Deferenten) um die Erde laufen.

Nach dem Niedergang des antiken Griechenland wurde die astronomische Forschung von den Arabern weitergeführt. Der kulturelle Aufschwung in der Zeit nach Mohammed führte in Bagdad und in Kairo zur Gründung von Sternwarten. Die bedeutendsten Werke der Antike wurden ins Arabische übersetzt. Zahlreiche arabische Sternnamen (Algol, Aldebaran) erinnern ebenso wie die von den Indern übernommenen "arabischen Ziffern" an die kulturellen Leistungen dieser Zeit.

Erst um 1200 begann auf dem Weg über Spanien der kulturelle Aufstieg des Abendlandes. Das ptolemäische Weltbild wurde als ausserordentlich kompliziert empfunden. So soll König Alfons X. von Kastilien, als er sich die Bewegung der Planeten erklären liess, ausgerufen haben: "Wenn unser Herrgott mich bei der Erschaffung der Welt zu Rate gezogen hätte, würde ich eine grössere Einfachheit empfohlen haben".

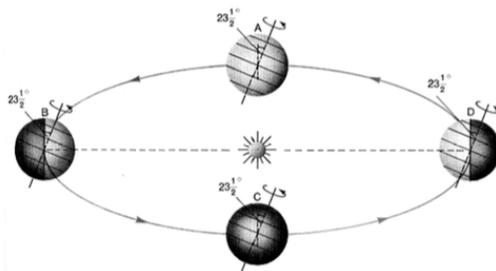
1.1.2 Das heliozentrische Weltbild

1.1.2.1 Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543)

Nikolaus Kopernikus war Domherr zu Frauenburg in Polen und gilt als Begründer des heliozentrischen Weltbilds. Im Jahre 1543 veröffentlichte er ein Buch mit dem Titel "De revolutionibus orbium coelestium" ("Über die Bewegung der Himmelskörper"). In der Widmung seines Werks an Papst Paul III. schreibt er: "Der tägliche Umlauf der Sterne deutet auf eine Drehung der Erde hin. Es wäre also gar nicht befremdend, wenn jemand der Erde neben dieser täglichen Umdrehung auch noch eine andere Bewegung zuschreiben würde... Ich habe nun durch keine andere Anordnung eine so bewundernswerte Symmetrie der Welt gefunden, als dadurch, dass ich die Sonne als Weltleuchte in die Mitte setzte, von wo sie, die umlaufenden Planeten lenkend, alles durchleuchten kann." Das kopernikanische Weltbild lässt sich in seiner einfachsten Form wie folgt beschreiben:

1.1.2.1.1 Das kopernikanische, heliozentrische Weltbild

- Die Sonne steht im Mittelpunkt der Welt.
- Die Sterne bewegen sich ebenfalls nicht, sondern ruhen in unermesslich grossen Entfernungen im Raum.
- Die Erde ist ein Planet und läuft auf einer Kreisbahn in einem Jahr um die Sonne. Sie dreht sich dabei von Westen nach Osten täglich einmal um ihre Achse.
- Der Mond läuft auf einer Kreisbahn um die Erde.
- Die Planeten bewegen sich in Kreisbahnen um die Sonne.
- Die Bahnebene der Erde heisst Ekliptik. In dieser Ebene bewegen sich in guter Näherung der Mond und die Planeten.
- Die Rotationsachse der Erde steht schief auf die Ekliptik. Sie bildet mit der Ekliptik–Normalen einen Winkel von 23.5° (siehe Abbildung 1.4) und behält während des jährlichen Erdumlaufes um die Sonne ihre Richtung im Raume bei.

Abbildung 1.4: Die Erde, die um 23.5° geneigt ist, kreist um die Sonne.

Mit diesen Annahmen wurde die Beschreibung der Planetenbewegung stark vereinfacht. Der ungleichmässige Lauf der Planeten konnte dadurch erklärt werden. Überholt z.B. die schnellere Erde den langsameren Mars, so scheint sich der Mars von der Erde aus gesehen kurze Zeit rückläufig zu bewegen (siehe Abbildung 1.5). Es stellte sich heraus, dass ein Planet für einen Umlauf auf der Himmelskugel stets die gleiche Zeit benötigt, was im geozentrischen Weltbild nicht der Fall war. Es liessen sich ferner in eindeutiger Weise die Verhältnisse der Planetenbahnradien angeben. Dies war ein weiterer Vorteil, denn im geozentrischen Weltbild waren die Verhältnisse der Deferenten-Radien fast beliebig wählbar.

Leider zeigte es sich, dass zwischen Beobachtung und Rechnung keine vollständige Übereinstimmung herrschte. Dieser fatale Umstand zwang Kopernikus zu seinem Verdruss, auch in sein System Epizykeln einzubauen.

1.1.2.2 Johannes Kepler (1571 – 1630)

Kepler hatte die kopernikanischen Ideen schon als junger Student an der Universität Tübingen kennengelernt und war von ihnen tief beeindruckt. Besonders interessierten ihn die Verhältnisse der Planetenbahnradien. Zuerst dachte er, die Planetenbahnen könnten eingeschriebene und umbeschriebene Kreise einer Reihe regelmässiger Vielecke sein. Als sich dieser Gedanke als unbrauchbar erwies, ersetzte er die Kreise durch Kugeloberflächen und die Vielecke durch die fünf regulären Körper Oktaeder, Ikosaeder, Dodekaeder, Tetraeder und Würfel. Seine Freude war gross, als er fand, dass die – damals noch recht ungenauen – Messdaten eine Deutung dieser Art zuzulassen schienen. Die Welt, so hatte es den Anschein, war nach einfachen geometrischen Gesetzen gebaut.

Um diese Vorstellungen an genauerem Beobachtungsmaterial überprüfen zu können, zog Kepler zum kaiserlichen Hofastronomen Tycho Brahe nach Prag (siehe Abbildung 1.6). Dieser hervorragende Himmelsbeobachter besass die besten Messergebnisse der damaligen Zeit. Obgleich ihm für seine Beobachtungen ein Fernrohr noch nicht zur Verfügung stand, erreichte er eine Messgenauigkeit von ungefähr einer Winkelminute. Das entspricht etwa dem dreissigsten Teil einer Vollmondbreite! Besonders genau hatte Brahe die Marsbahn vermessen, und Kepler machte sich an die Aufarbeitung dieses riesigen Zahlenmaterials. Dabei zeigte sich nach langer mühevoller Rechnung, dass mit Kreisbahnen nicht durchzukommen war. Nun tat Kepler einen ungeheuer bedeutungsvollen, kühnen Schritt:

Kepler gab die aristotelische Vorstellung von der gleichförmigen Kreisbewegung auf, zog die Ellipse als mögliche Bahnform heran und hatte mit einem Schlag vollen Erfolg. Im Jahre 1609 veröffentlichte Kepler in seinem Buch „Astronomia nova“ (Neue Astronomie) die Ergebnisse seiner mühseligen Arbeit und fasste sein Wissen in zwei Gesetzen zusammen.

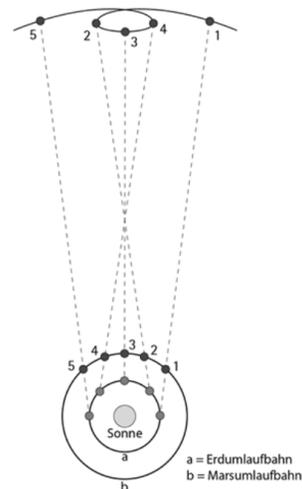


Abbildung 1.5: Bei der Umrundung der Sonne kommt es beim Mars aus Sicht der Erde zu dem Phänomen der sogenannten Rückläufigkeit, die die scheinbare Bewegung des Mars umschreibt.

Damit waren die Bewegungsgesetze der Planeten entdeckt, und die komplizierte Maschinerie der Epizykel-Bewegungen hatte sich als überflüssig herausgestellt. Enthusiastisch schrieb Kepler: “Endlich habe ich ans Licht gebracht, dass die Harmonie der Natur in ihrem ganzen Umfang und mit allen ihren Einzelheiten in den himmlischen Bewegungen vorhanden ist, nicht zwar auf diese Weise, wie ich es mir früher dachte, sondern auf eine andere durchaus vollkommene Weise...”, und er schloss mit den Worten: “Hier schreibe ich ein Buch, möge es gelesen werden von der Mitwelt oder der Nachwelt, gleichviel, es wird seines Lesers Jahrhunderte harren, wenn Gott selbst sechs Jahrtausende hindurch den erwartete, der sein Werk bestaunte, Johannes Kepler”. (Nach Auffassung der damaligen Zeit wurde die Erde am 26. Oktober des Jahres 4004 v.u.Z. um 9 Uhr von Gott erschaffen.)

1.1.3 Der Streit um das Weltbild

Das heliozentrische Weltbild ist uns heute zur Selbstverständlichkeit geworden. Für die Zeitgenossen Keplers war dies aber keineswegs der Fall. Man hielt es für widersinnig, dass etwas so Grosses wie die Erde ein winziger Bruchteil des Weltalls sein sollte, und für noch viel widersinniger, dass etwas so Grosses und Festes sich bewege. Man glaubte auch, einige wichtige Gründe zu kennen, die dagegen sprechen. Die damaligen Wissenschaftler sagten beispielsweise:

- Wenn die Erde tatsächlich an einem Tag eine Umdrehung vollführen würde, müssten fallende Körper in westlicher Richtung auf die Erde aufschlagen, weil sich die Erde während der Fallbewegung weitergedreht hat. Ausserdem müsste ständig ein fürchterlicher Sturm von Osten nach Westen wehen, so dass “ein Vogel, der ausfliegt, nicht mehr imstande wäre, in sein Nest zurückzukehren”.
- Wenn die Erde im Laufe eines Jahres wirklich um die Sonne liefe, müsste die scheinbare Grösse gewisser Sternbilder jährliche Schwankungen zeigen, da sich ihre Entfernung während eines Erdumlaufes verändert. (Hier erwiderte übrigens bereits Kopernikus, die Erde und ihre Bahn stünden zur Grösse des Weltalls im gleichen Verhältnis “wie ein Punkt zu einem Klumpen Erde”.)
- Wenn sich die Planeten nicht auf Kreisen, den vollkommensten Kurven der Schöpfung, bewegen, warum laufen sie dann ausgerechnet auf Ellipsen und nicht auf einer der unzähligen anderen denkbaren Kurven?

Dazu kamen noch theologische Einwände:

- In der Bibel heisst es im 10. Kapitel des Buches Josua: “Und der Herr sprach: “Sonne, stehe still zu Gibeon, und Mond im Tale Ajalon”. Da standen die Sonne und der Mond still, bis dass sich das Volk an seinen Feinden rächte.” Die Sonne muss sich daher normalerweise bewegen und kann nicht im Mittelpunkt des Planetensystems ruhen.
- Falls die Erde nur ein Planet ist und Fixsterne Sonnen sind, die ebenfalls wieder bewohnte Planeten haben können, weshalb ist Christus gerade auf die Erde herabgestiegen?

Es war nicht immer ganz leicht und auch nicht ungefährlich, gegen diese Argumente Stellung zu nehmen. Galilei konnte jedoch das heliozentrische Weltbild mit weiteren Beobachtungen stützen. Er hatte von der Erfindung des Fernrohres gehört und sich selbst eine derartige “optische Röhre” für den eigenen Gebrauch gebaut. Und weil er “weder Mühe noch Ausgaben

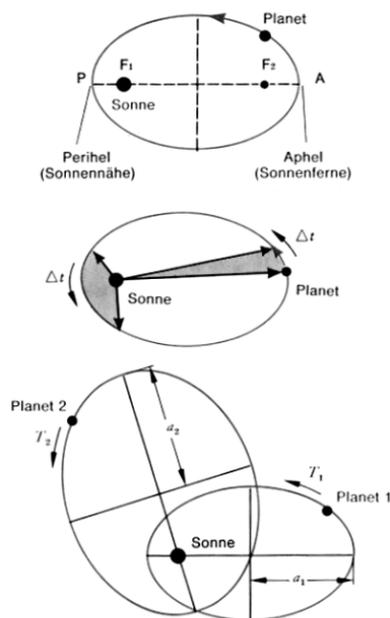


Abbildung 1.7: Die drei Keplerschen Gesetze



Abbildung 1.8: Galileis Teleskop

sparte”, hatte er bald ein “ausgezeichnetes Instrument” fertiggestellt, das ungefähr 30fach vergrösserte (siehe Abbildung 1.8). Dieses Gerät richtete er zunächst auf den Mond und erblickte dort Musterungen, die er als Schatten deutete, welche von den Unebenheiten der Mondoberfläche geworfen wurden.

Er schreibt: “Ganz ähnliche Erscheinungen haben wir hier auf der Erde zur Zeit des Sonnenaufgangs, wenn die Täler noch nicht vom Licht durchflutet sind, die Berge aber bereits im Glanz der Lichtstrahlen funkeln”. Der Mond war also keineswegs eine vollkommene Kugel, wie es Aristoteles behauptet hatte.

Nun richtete Galilei sein Fernrohr auf Jupiter und sah vier Monde um den grossen Planeten kreisen (siehe Abbildung 1.9 (b)). Er erkannte, dass dieses System eine verkleinerte Kopie des grossen Sonnensystems ist. So wie Jupiter von seinen Monden wird offenbar die Sonne von ihren Planeten umlaufen. Schliesslich entdeckte er noch den Phasenwechsel der Venus, der nur aus der Annahme einer Umlaufbewegung dieses Planeten um die Sonne erklärbar war (siehe Abbildung 1.9 (c)). Am 30. Januar 1610 schrieb er an den Grossherzog der Toskana: “... Ich bin ganz ausser mir vor Staunen und Gott unendlich dankbar, dass es ihm gefallen hat, mir die Entdeckung so grosser Wunder zu erlauben...”.

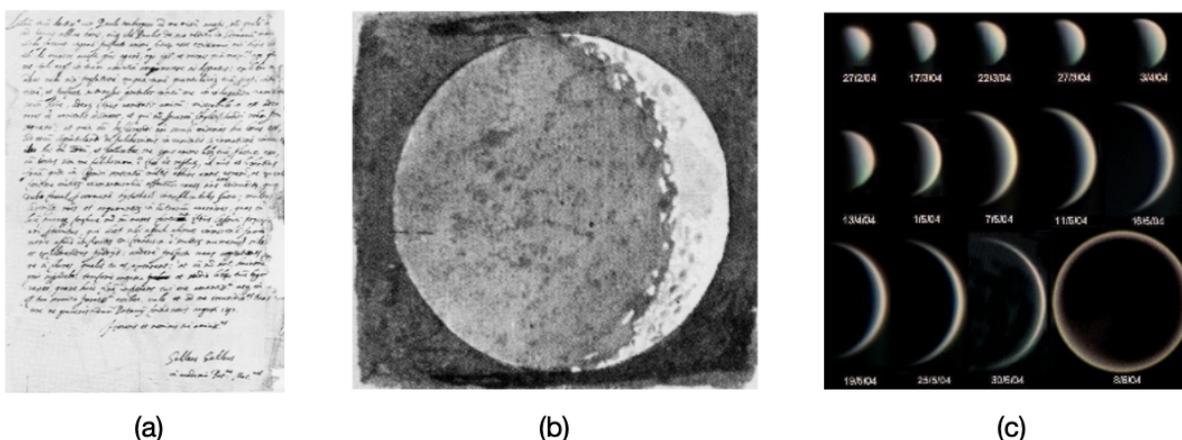


Abbildung 1.9: (a) Ein Brief Galileis an Kepler: Hier bekennt sich Galilei offen zum heliozentrischen Weltbild. (b) Mit dieser Zeichnung zeigte Galilei, wie er den Mond durch das Fernrohr sah. Die gezackte Hell-Dunkel-Grenze deutet auf eine gebirgige Mondoberfläche hin. (c) Die Phasen der Venus: Die Bilder beweisen, dass die Venus um die Sonne und nicht um die Erde kreist. Je mehr sich ein Planet der Erde nähert, desto grösser erscheint er. (Beachten Sie die Beleuchtung des Planeten!)

1.2 Das Newtonsche Gravitationsgesetz

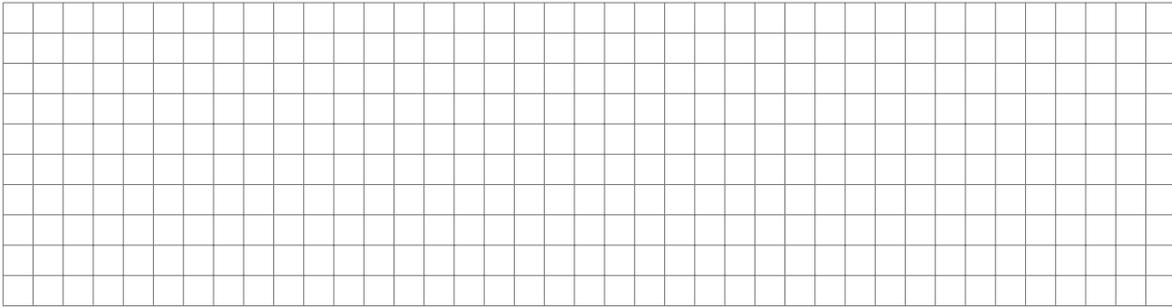
1.2.1 Die Massenanziehung

Jeder Körper hat eine Eigenschaft, die wir Masse nennen und in Kilogramm messen. Diese Masse ist für die Trägheit des Körpers zuständig (Das Trägheitsgesetz, Sie erinnern sich!) und wir kennen sie bereits gut aus dem Gesetz: $|\vec{F}| = m \cdot a$.

Die Masse besitzt jedoch noch eine weitere erstaunliche Eigenschaft: Die Massen ziehen sich gegenseitig an. Die Masse ist also auch für die Gewichtskraft, die Schwere eines Körpers verantwortlich (schwere Masse). Diese Eigenschaft kennen wir ansatzweise aus dem Ausdruck für die Gewichtskraft: $|\vec{F}| = m \cdot g$.

Die Kraft, die aus dieser Massenanziehung resultiert, nannte Newton Gravitationskraft. Bei der Gravitationskraft handelt es sich um eine der vier fundamentalen Kräfte (nebst der elektromagnetischen, der starken und der schwachen Wechselwirkung) in der Physik.

Zwei Punkte mit den Massen m_1 und m_2 und dem Abstand r ziehen einander mit der Gravitationskraft $|\vec{F}_G|$ an. Sie beträgt:

Das Newtonsche Gravitationsgesetz:

Die Gravitationskraft zeigt entlang der Verbindungslinie der beiden Körper, wie in Abbildung 1.10 zu sehen ist.

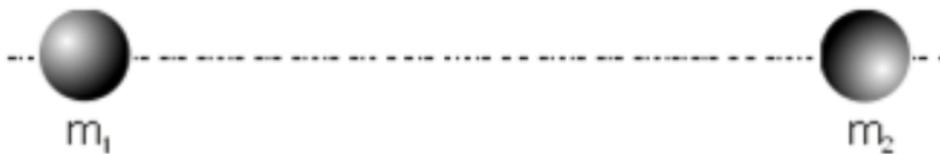


Abbildung 1.10: Zwei Massen in einer bestimmten Distanz mit der eingezeichneten Wirkungslinie.

1.2.2 Messung der Gravitationskonstante

Sechzig Jahre nach Newtons Tod konnte das Gravitationsgesetz von Henry Cavendish mit Hilfe einer Drehwaage (siehe Abbildung 1.11) im Laboratorium experimentell bestätigt werden. Dabei wurde auch zum ersten Mal der numerische Wert der Gravitationskonstante G ermittelt.

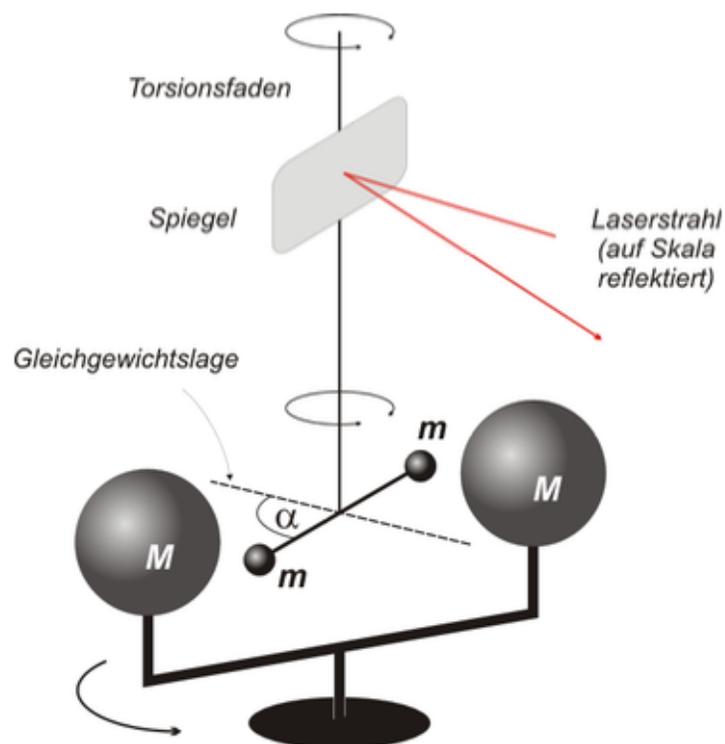
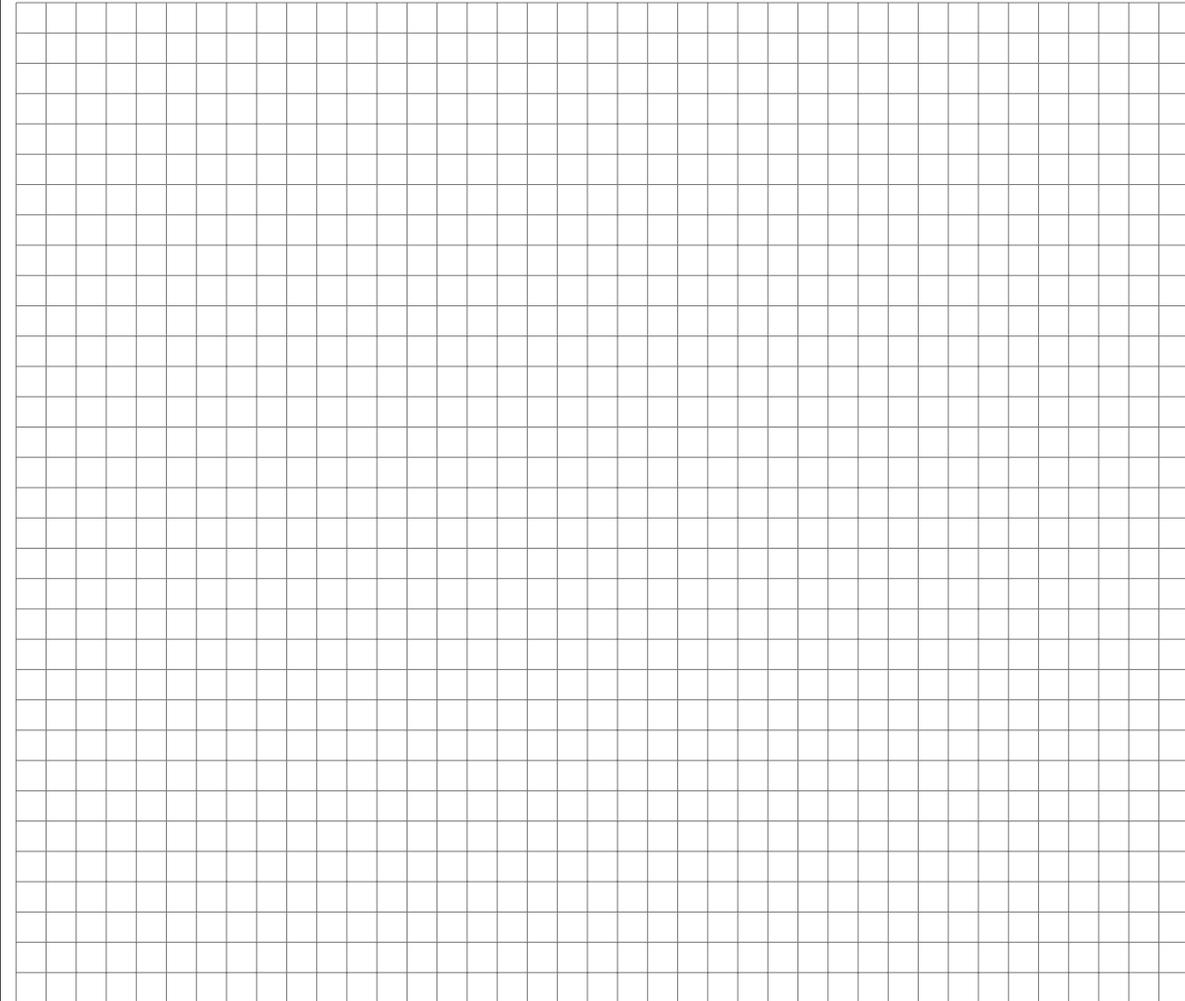


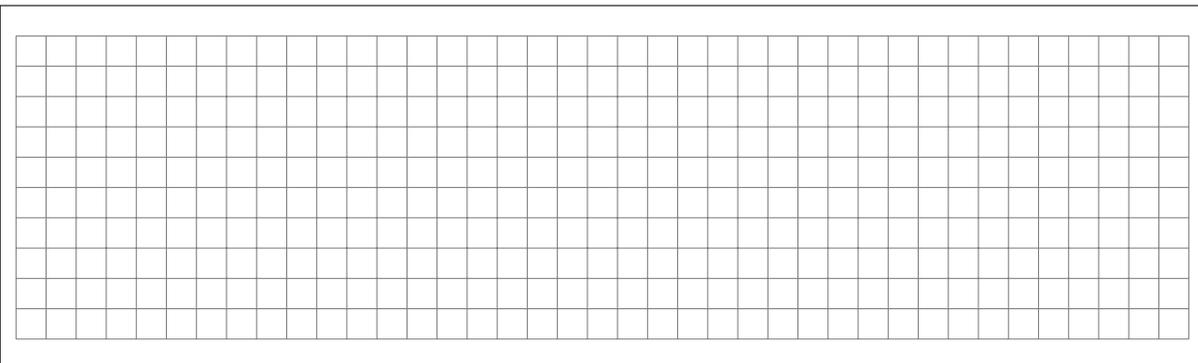
Abbildung 1.11: Drehwaage.

Machen Sie Notizen zum Aufbau der Gravitationswaage:



1.2.3 Der Spezialfall $|\vec{F}| = m \cdot g$

Bis anhin haben wir für die Gravitationskraft immer den Ausdruck: $|\vec{F}| = m \cdot g$ mit $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ verwendet. Gilt dieses Gesetz nun nicht mehr? Doch, dieses Gesetz gilt immer noch. Es handelt sich dabei jedoch um einen Spezialfall des allgemeinen Newtonschen Gravitationsgesetzes. Für die Kraft $|\vec{F}|$ auf einen Körper mit der Masse m in einem konstanten Abstand r von einer Zentralmasse M gilt:



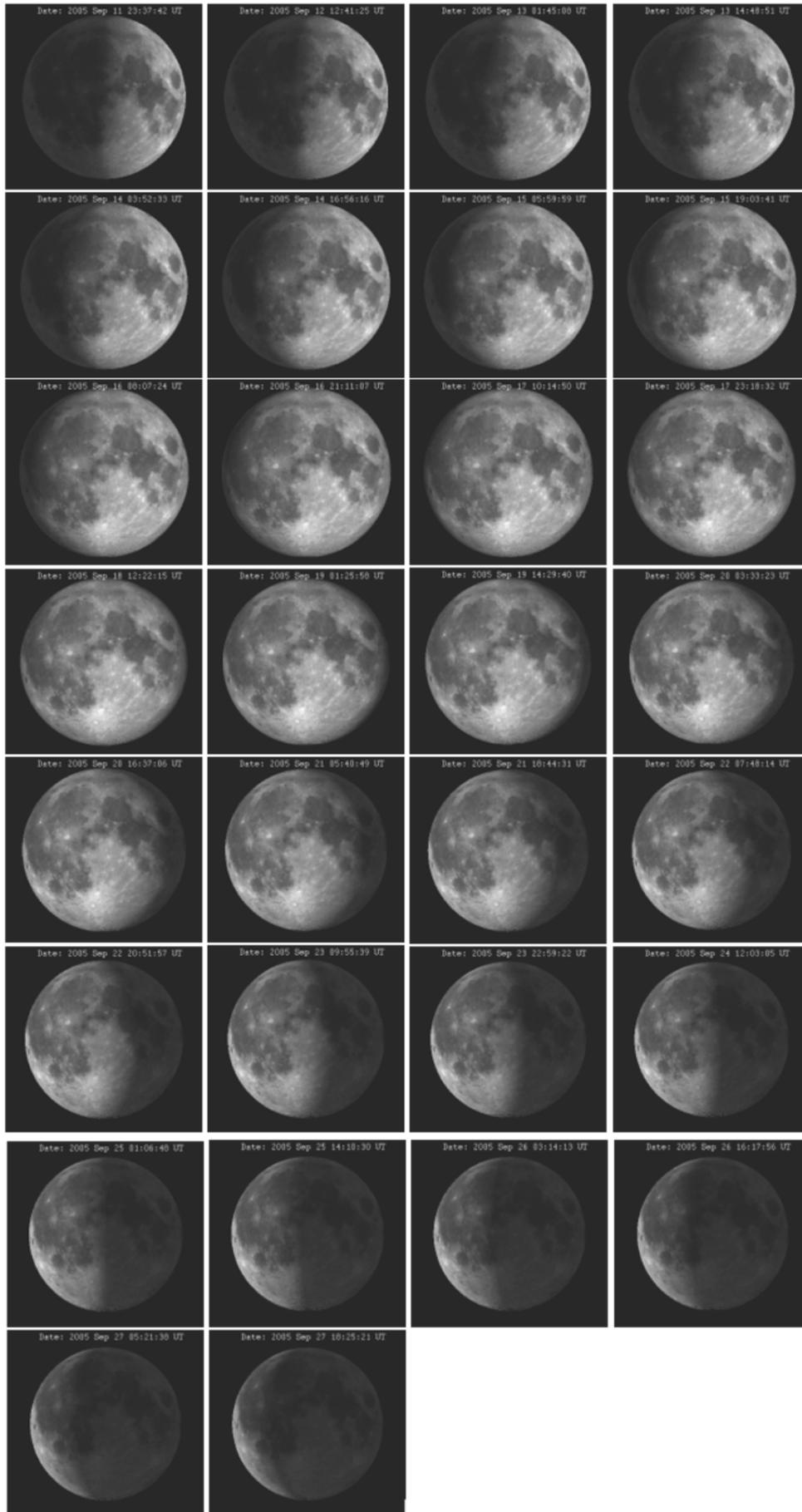
Die Fallbeschleunigung g ist also keine Konstante, sondern hängt von der Zentralmasse M und dem Abstand r von der Masse ab. Auch auf der Erde ist g nicht eine Konstante, sondern ist lokal unterschiedlich.

1.3 Der Mond

1.3.1 Mondphasen

In diesen Bildern sehen Sie den Mond. Aus diesen Figuren können Sie allerhand herauslesen. Was finden Sie alles über den Mond heraus? Welche typischen Ereignisse sehen Sie? Wie entstehen die Mondphasen? Zeichnen Sie nach den Bildern eine Figur dazu.





1.3.2 Mondfinsternis

Diese Bilder zeigen dem Mond bei einer Mondfinsternis. In der dritten und der vierten Zeile ist der Mond in Wirklichkeit viel, viel dunkler als in den anderen Zeilen. Die Fotografie wurde wesentlich länger belichtet, damit wir noch etwas sehen und deshalb erscheint der Mond auch in diesen Zeilen recht hell.



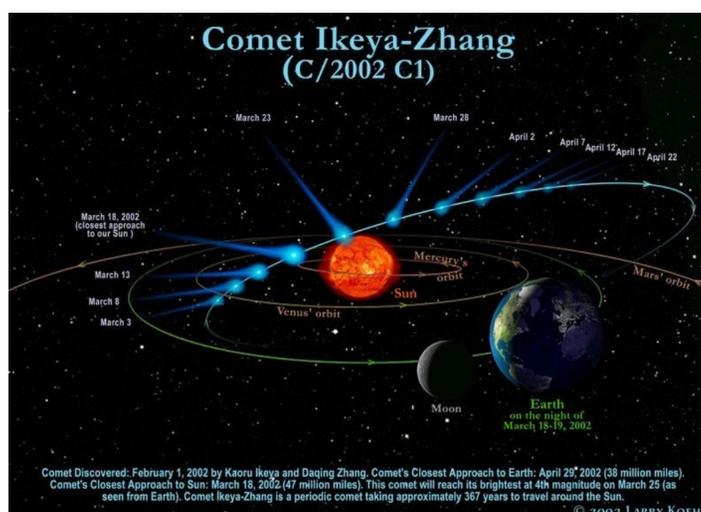
1.4 Aufgaben

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.1 *Die Entwicklung der Weltbilder*.

- 1) Begründungsaufgaben
 - a) Welche Planeten kann man mit blossen Auge am Himmel sehen?
 - b) Wie bewegen sich die Planeten für einen Beobachter auf der Erde?
 - c) Wie bewegen sich die Himmelskörper nach Aristoteles' Auffassung?
 - d) Wie brachte Ptolemäus die Planetenbewegung mit der aristotelischen Auffassung von der gleichförmigen Kreisbewegung der Himmelskörper in Einklang? Was bedeuten die Worte "Epi-zykel" und "Deferent".
 - e) Welche Vorstellungen hatte Ptolemäus bzw. Kopernikus von der Welt? (Beschreiben Sie in beiden Weltbildern die Bewegung der Fixsterne, der Sonne, der Erde, des Mondes und der Planeten.)
 - f) Was versteht man unter den Himmelspolen?
 - g) Was versteht man unter der Ekliptik im geozentrischen Weltbild und im heliozentrischen Weltbild?
 - h) Welchen Winkel schliesst die Erdachse mit der Ekliptik ein?
 - i) Welche Vorteile hat das helio- bzw. das geozentrische Weltbild?
 - j) Wie erklärt Kopernikus die Schleifenbewegung der Planeten?
 - k) Worin bestand Keplers grosse Leistung?
 - l) Wie lauten die drei Keplerschen Gesetze?
 - m) Welche Einwände wurden gegen das heliozentrische Weltbild erhoben?
 - n) Welche Entdeckungen gelangen Galilei mit dem Fernrohr?
- 2) Aus dem 3. Keplerschen Gesetz folgt, dass das Verhältnis $\frac{a^3}{T^2}$ für alle Planeten um eine Sonne konstant ist. Kontrollieren Sie, ob diese Aussage stimmt. Berechnen Sie das Verhältnis $\frac{a^3}{T^2}$ für drei Planeten aus unserem Sonnensystem. Nehmen Sie dazu die Werte aus der Formelsammlung. Ist das Verhältnis tatsächlich konstant?
- 3) Der Abstand a_2 des Merkurs zur Sonne beträgt ca. $\frac{2}{5}$ des Abstands a_1 der Erde zur Sonne. Berechnen Sie die Umlaufzeit T_2 des Merkurs um die Sonne in Tagen. (Es sind keine Werte aus der Formelsammlung notwendig.)
- 4) Das Licht braucht von der Sonne zur Erde ca. 8.5 min. Wie gross ist der Abstand des Jupiters, wenn seine Umlaufzeit 4'333 Tage beträgt?
- 5) Im Frühjahr 1997 konnte der Komet "Hale-Bopp" am Himmel beobachtet werden. Seine Erscheinung war leider nur von kurzer Dauer. Erst in etwa 2500 Jahren wird er wieder auftauchen. Erklären Sie mit Hilfe des 2. Kepler'schen Gesetzes, weshalb Kometen im Vergleich zu ihren Umlaufzeiten nur recht kurze Zeit sichtbar sind.
- 6) Wie gross ist der Bahnradius der Erde im Perihel (Sonnennächster Punkt) und im Aphel (Sonnenfernster Punkt). In der Tabelle in der Formelsammlung finden Sie die Angaben zur grossen Bahnhalbachse und zur numerischen Exzentrizität der Erdbahn. Berechnen Sie daraus die gesuchten Werte.
- 7) Pluto ist sehr klein und sehr weit entfernt. Es ist bereits erstaunlich, dass wir überhaupt Bilder von ihm besitzen. Werden viele Bilder des Weltraumteleskop Hubble zusammengenommen, lässt sich sogar ein Bild berechnen, das Strukturen in der Oberfläche erkennen lässt. Pluto hat einige Eigenschaften der Planeten nicht. Er gilt deshalb nicht mehr als solcher. Eine seiner Besonderheiten ist

die starke Ellipsenform seiner Bahn um die Sonne. Dies wiederum führt zu grösseren Unterschieden in der Umlaufgeschwindigkeit des Planeten. Wie verhält sich die Bahngeschwindigkeit im Perihel und im Aphel? Pluto hat eine grosse Bahnhalfachse a von 5.90×10^{12} m und eine numerische Exzentrizität von $\epsilon = 0.25$. Seine Bahngeschwindigkeit v_a beträgt im Aphel $3.6 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Wie schnell ist er im Perihel? Hinweis: Die Bahn ist für einen kurzen Zeitraum annähernd kreisförmig. Sie können also die beiden Situationen mit zwei Kreisen mit unterschiedlichen Radien beschreiben.

- 8) Die Entfernung des Saturns von der Sonne beträgt rund 9.5 AE. Zeigen Sie mit dem 3. Keplerschen Gesetz, dass Saturn gut 29 Jahre braucht, um die Sonne zu umkreisen.
- 9) Ein bekannter Komet ist der Ikeya–Zhang. Im Jahre 2002 war er das letzte Mal zu sehen. Diesen Kometen haben Sie also knapp verpasst. Werden Sie ihn in Ihrem Leben nochmals zu Gesicht bekommen? Ikeya–Zhang ist im Perihel 0.5 AE von der Sonne entfernt. Sein Aphelabstand ist 114.9 AE, er geht also über die Plutobahn hinaus!
 Bonusfrage: In der Skizze zum Komet ist der Schweif des Kometen eingezeichnet. Können Sie sich erklären, weshalb der Schweif seine Richtung ändert?



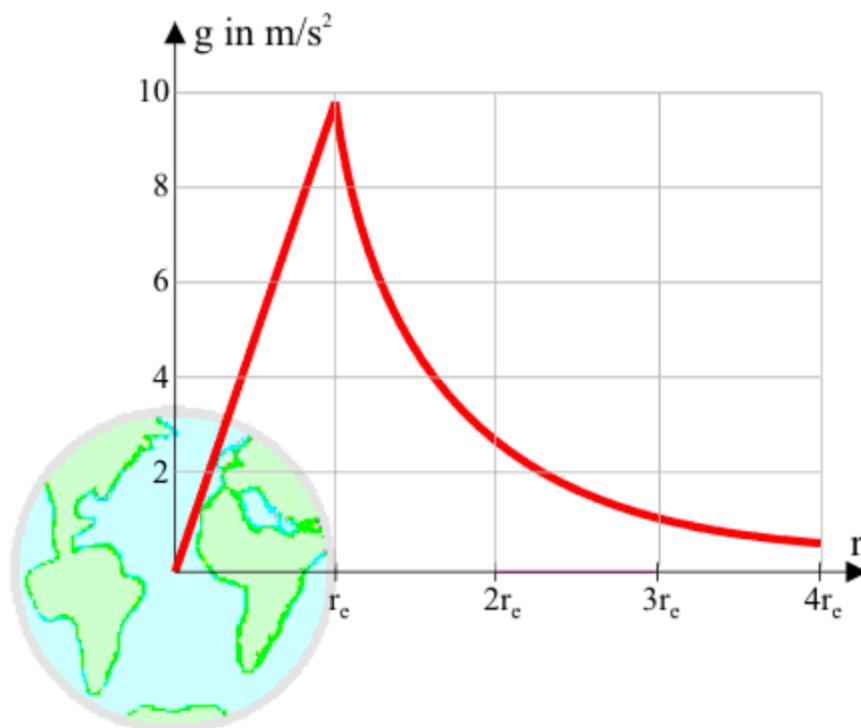
- 10) Ebbe und Flut führen auf der Erde zu Reibungseffekten, die die Erdrotation abbremsen. Durch die Wechselwirkung mit den Ebbe- und Flutbergen gewinnt der Mond an Energie und entfernt sich von der Erde pro Jahr um durchschnittlich etwa 3.5 Zentimeter. Die heutige Distanz beträgt 384'403 km. Wie lange dauerte die siderische Umlaufzeit des Mondes vor 50'000 Jahren? Heute dauert sie 27.32166 Tage.

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.2 Das Newtonsche Gravitationsgesetz.

- 11) Gravitationskraft zwischen zwei Körpern:
- Berechnen Sie die Gravitationskraft, mit der sich zwei Supertanker von je 300000 t Masse im Abstand von 100 m gegenseitig anziehen. Wie viel Prozent beträgt diese Gravitationskraft von der Gewichtskraft eines Tankers?
 - Berechnen Sie die Gravitationskraft zwischen zwei Protonen, die sich gerade berühren. (Protonenmasse: $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg, Protonenradius: $r_p = 1.2 \cdot 10^{-15}$ m)
 - Romeo (75 kg) und Julia (62 kg) schweben im Weltall. Sie sind 3 m voneinander entfernt. Mit welcher Kraft ziehen sie sich gegenseitig an?
- 12) Bei einem Mondflug muss die Rakete gegen die Gravitationskraft der Erde aufsteigen. Je näher sie an den Mond kommt, desto mehr wird sie vom Mond angezogen. In welcher Entfernung vom Erdmittelpunkt fällt die Rakete auf den Mond hinunter? Gefragt ist also die Distanz von der Erde, in

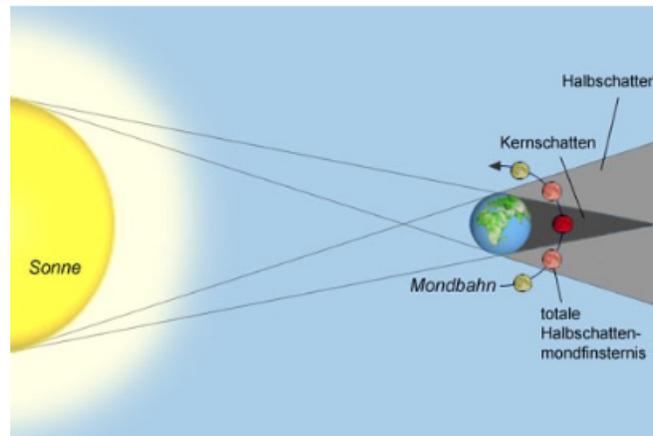
der sich die von Erde und Mond erzeugten Gravitationskräfte gerade aufheben. Die Mittelpunkte der beiden Himmelskörper haben eine Entfernung von etwa 60 Erdradien, das Massenverhältnis beträgt ungefähr 81:1.

- 13) Vergleich zu elektrischen oder magnetischen Kräften ist die Gravitation eine sehr schwache Kraft. Sie ist deshalb schwierig zu messen. 1787 gelang es Henry Cavendish zum ersten Mal, die Anziehung zweier Bleikugeln im Labor zu messen. Die von Cavendish verwendeten Bleikugeln hatten einen Durchmesser von 5.1 cm und 20.3 cm. Welche Anziehung üben sie aufeinander aus, wenn sie sich gerade berühren?
- 14) In jedem Lexikon können Sie nachlesen, wie schwer die Erde ist. Knaurs Lexikon nennt den Wert $5.97 \cdot 10^{24}$ kg.
- Wie kann diese Zahl überhaupt bestimmt werden? Führen Sie die entsprechende Berechnung durch.
 - Überprüfen Sie auch durch eigene Rechnung den im Lexikon angegebenen Wert für die mittlere Dichte der Erde ($\rho_E = 5515 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$).
- 15) Wie gross ist die Fallbeschleunigung auf dem Mond, wenn wir die Mondmasse und seinen Radius kennen?
- 16) Der weisse Zwergstern Sirius B hat die Masse unserer Sonne und nur den 0.005-fachen Sonnenradius. Welche Fallbeschleunigung würde ein Körper auf der Oberfläche von Sirius erfahren? Welche Dichte hat Sirius B?
- 17) Mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche nimmt die Fallbeschleunigung ab.
- Berechnen Sie die Fallbeschleunigung in 300 km über dem Erdboden.
 - In welcher Höhe über dem Boden beträgt die Fallbeschleunigung $\frac{1}{4}g$?



Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf das Kapitel 1.3 *Der Mond*.

18) Die untenstehende Figur zeigt, wie eine Mondfinsternis zustande kommt.



- Beschreiben Sie den Vorgang in Worten.
 - Ist bei einer Mondfinsternis Neumond, Halbmond, Vollmond oder nichts von all dem?
 - Können Sie abschätzen, ob eine Mondfinsternis Sekunden, Minuten oder Stunden dauert?
- 19) Noch eindrücklicher als eine Mondfinsternis ist eine Sonnenfinsternis.



- Diese drei Bilder entstanden während der ringförmigen Sonnenfinsternis am 3. Oktober 2005 in Madrid. Beschreiben Sie, was sich verändert.
- Erklären Sie mithilfe der Figur am Ende der Aufgabe, wie eine Sonnenfinsternis zustande kommt.
- Ist bei einer Sonnenfinsternis Neumond, Halbmond, Vollmond oder nichts von all dem?
- Was denken Sie, in welchem Moment wurde das Bild aufgenommen?
- Gibt es mehrere Arten von Sonnenfinsternissen? Wie würden Sie sie unterscheiden?

