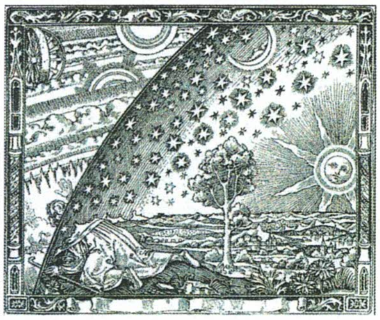
2. Astronomie

2.1 Der Wandel des Weltbildes in der Renaissance

Das Weltbild im Mittelalter

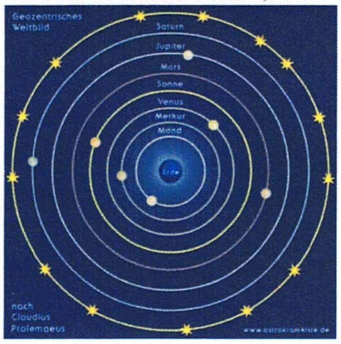
Auch wenn bereits in der griechischen Antike Eratosthenes den Umfang der Erdkugel ziemlich genau bestimmt hatte, herrschte im Mittelalter vor allem in der einfachen Bevölkerung ein Bild des Kosmos vor, das sich aus der täglichen Erfahrung des Menschen ergab.

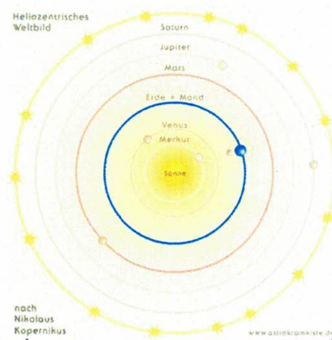


- die Erde ist eine Scheibe
- darüber wölbt sich die Himmelskugel mit Sonne, Mond und Sternen

Kopernikus: Bruch mit der Antike

Der Vorschlag von Kopernikus, statt der Erde die Sonne in den Mittelpunkt des Weltsystems zu setzen, wurde in der katholischen Kirche als Gotteslästerei wahrgenommen. Die Kirche hatte die Naturphilosophie von Aristoteles aus der griechischen Antike übernommen. Das geozentrische Weltbild untermauerte die These vom Mensch als "Krone der Schöpfung"





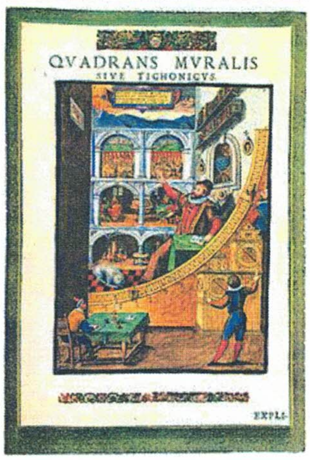
<u>geozentrisch</u> (Mittelalter)
die Erde ist im Mittelpunkt

<u>heliozentrisch</u> (Neuzeit)
die Sonne ist im Mittelpunkt

Die kath. Kirche lehnte das neue, heliozentrische Weltbild mehrheitlich ab.

Die Vermessung des Himmels durch Tycho Brahe

Die Idee von Kopernikus konnte sich auch in der Wissenschaft zunächst nicht durchsetzen, da das Modell im Vergleich zum antiken keine wesentlichen Vorteile bei der Erklärung der Beobachtungen brachte. Der Grund dafür lag in den relativ ungenauen Beobachtungsdaten, deren Präzission immer noch dem Stand der antiken Messungen von Ägyptern und Griechen entsprach. Das änderte sich durch Tycho Brahe, der als junger Mann vom Buch von Kopernikus so begeistert war, dass er Astronom wurde.



- studiert und forscht im protestantischen Dänemark
- erhält vom König die Insel Hven zum Bau einer Sternwarte

Abbn. aus wikipedia.de

- Brahe revolutioniert die Genauigkeit astronomischer Messungen, die sich zuvor mehrere Tausend Jahre nicht verbessert hatte, mit dem Mauerquadrant (große Winkelskala)

Die irren Schleifenbahnen der Planeten

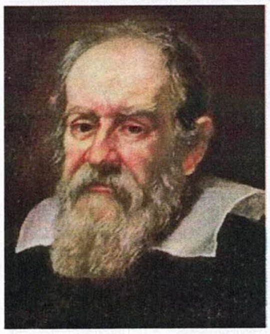
Seit der Antike war die seltsame Bewegung einer kleinen Gruppe von Sternen seltsame Schleifen aufwies, während der Rest des Sternhimmels stets die gleiche Struktur zeigte. Man nannte diese merkwürdigen Himmelskörper Wandelsterne, griechisch „planetes“.

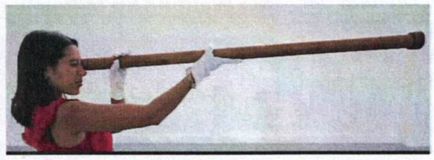
Eine schöne Animation gibt's dazu auf Leifiphysik, Suchbegriff „schleifenbahnen“.

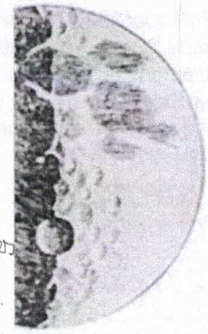
mit dem heliozentrischen Weltbild konnten die merkwürdigen Schleifenbahnen der Planeten im Jahresverlauf erklärt werden

Mondkrater und Sonnenflecken - Die Entzauberung des Himmels

Anfang des 17. Jahrhunderts baute der italienische Physiker Galileo Galilei die Erfindung eines holländischen Brillenmachers nach: das Teleskop zur Vergrößerung weit entfernter Gegenstände. Er war der erste Mensch, der es zur Himmelsbeobachtung einsetzte. Er beschrieb den Mond als zerklüfteten Himmelskörper mit Bergen und Kratern und brach mit der Vorstellung der himmlischen Vollkommenheit.







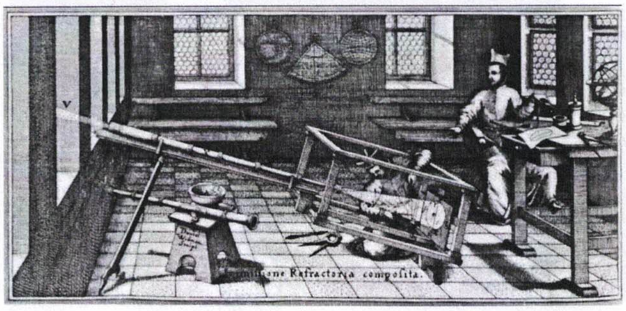
Galilei erfährt von der Erfindg eines holländischen Brillenmachers und baut dessen Fernrohr nach.

Abbn. aus wikipedia.de

Handskizze von Galilei

Galilei ist der erste, der damit den Himmel beobachtet. Er beschreibt den Mond mit Bergen und Kratern erdähnlich im Widerspruch zur Lehre von göttlich-vollkommenen Himmelskörpern

Ausgerechnet ein Mann der Kirche, der in Markt Wald gebohrene Jesuitenpater Christoph Scheiner entdeckte mit Hilfe eines Projektionsverfahrens, dass sich auf der angeblich vollkommenen Sonne schwarze Flecken befinden.

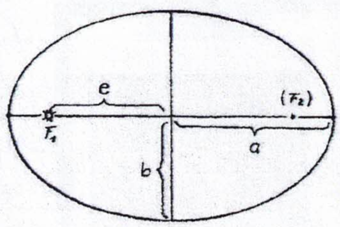


Der Jesuitenpater Scheiner projeziert die Sonne und entdeckt die Sonnenflecken, die Sonne ist nicht mehr himmlisch makellos.

Achtung: Nicht mit Fernrohr oder sonstigen Linsen die Sonne beobachten!
—> Erblindungsgefahr!

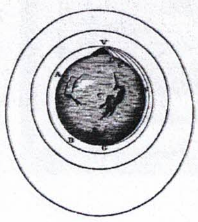
Kepler und Newton - Die moderne Weltsicht setzt sich durch

Auf der Grundlagen der genauen Messungen von Tycho Brahe gelang Johannes Kepler die entscheidende Verbesserung des Weltmodells von Kopernikus. Er ersetzte die vollkommenen Kreisbahnen durch Ellipsen, die die Bahnen der Planeten perfekt beschreiben konnten.



Auf der Grundlage von Tycho Brahes präzisen Beobachtungsdaten findet Kepler die Ellipse zur Beschreibung der Planetenbahn

Isaac Newton lieferte schließlich mit seiner Lehre von der Dynamik die Erklärung für die Bahnen der Planeten. Ähnlich wie ein geworfener Stein unterliegt deren Flugbahn der gravitativen Anziehung des Zentralgestirns, das sie umlaufen.



Newton begründet die Planetenbahnen mit seinen Gesetzen zur Mechanik, die auf der Erde und am Himmel gelten.

—> In der Renaissance wachsen Himmel und Erde zusammen, der Himmel verlor seine göttliche Stellung. Die geltende Lehre wurde in Frage gestellt und überholt.

Selbst-Check:
- **geozentrisches und heliozentrisches Weltbild**
- **Tycho Brahe**
- **Mondkrater und Sonnenflecken**
- **Kepler-Ellipse und Newton-Gesetze**

Aufgabe:

Informiere Dich im Buch oder in digitalen Medien über den Wandel des Weltbildes.

2.2 Die Kepler-Gesetze

Aufbau des Sonnensystems

Die Abfolge der Planeten ist hinlänglich bekannt und lässt sich mit Sätzen wie „Mein Vater erklärt mir jeden Sonntag unseren Nachthimmel" behalten. Pluto zählt in der aktuellen Sichtweise nicht mehr als Planet, sondern nur noch als Exoplanet (Zwergplanet).

Die Entdeckung des Kleinplaneten Sedna entfachte eine Debatte, welche Himmelskörper als Planeten eingestuft werden sollten. In der Folge wurde Pluto der Planeten-status aberkannt.

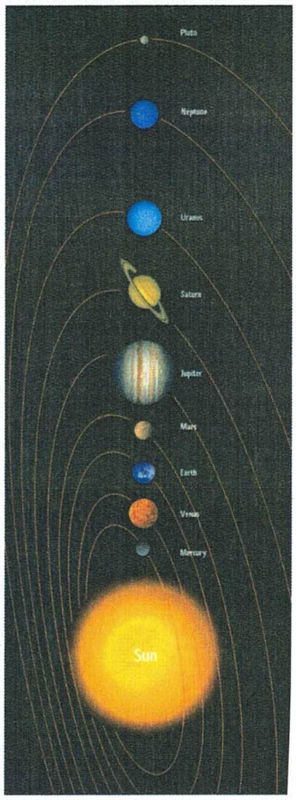


Abb. aus geo.de
Größen und Abstände der Himmelskörper nicht maßstabsgetreu

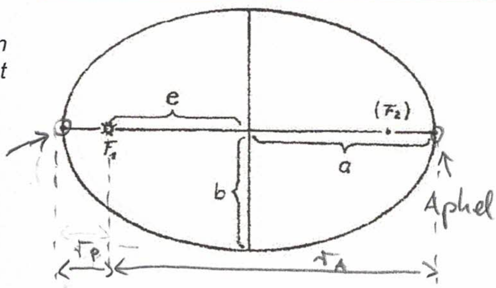
Neptun
Uranus
Saturn
Jupiter
Mars
Erde
Venus
Merkur
Sonne

Nachthimmel
unseren
Sonntag
jeden
mir
erklärt
Vater
Mein

Die 3 Gesetze von Kepler

Auf der Basis der genaueren Daten von Tycho Brahe gelang Johannes Kepler der entscheidende Schritt zur mathematischen Beschreibung der Planetenbahnen: die Abkehr vom der "göttlichen" Kreisform und die Nutzung der Ellipse.
Alle drei Keplergesetz sind auf den Leifiseiten animiert unter Teilgebiet Astronomie – Planetensystem.

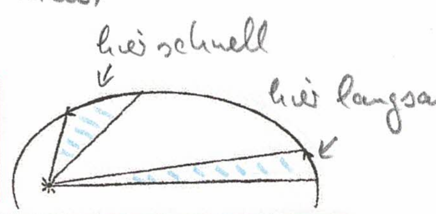
Die Planeten bewegen sich ....auf Ellipsenbahnen.... um die Sonne.
Dabei steht die Sonne in einem der ....Brennpunkte.... der Ellipse.



a: große Halbachse (= mittlerer Abstand)
b: kleine Halbachse
F_1, F_2: Brennpunkte (Sonne)
e: lineare Exzentrizität (e=0 → Kreis)

$r_P + r_A = 2 \cdot a$

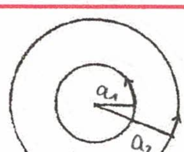
Der Fahrstrahl Sonne-Planet überstreicht in
....gleichen Zeiten gleiche Flächen....



Beachte:

Die Gesetze gelten jeweils für alle Körper, die dasselbe Zentralgestirn (z.B. die Sonne) umrunden, also auch Raumsonden oder Kometen. Bei der Umrundung eines anderen Gestirns (z.B. Satelliten um die Erde) ergibt sich ein anderer Wert.

Die ....Quadrate.... **der Umlaufzeiten** __zweier__ Planeten verhalten sich wie die ....dritten Potenzen.... **der großen Halbachsen** der Ellipsen.



$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \rightarrow \frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \text{const.}$$

Typisch misst man die Umlaufdauer eines Planeten und berechnet daraus den Abstand zur Sonne zu berechnen. ***Für Saturn misst man eine Umlaufdauer von 29,5 a. Berechne daraus den mittleren Abstand zur Sonne (= Länge der großen Halbachse).***

Basic: Berechnung von Planetenbahnen

Beachte:

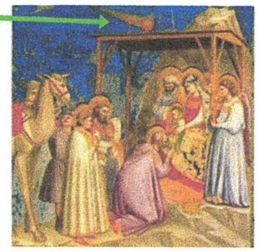
Die Längeneinheit bei dieser Berechnung ist 1 AE (Astronomische Einheit).
Dabei entspricht 1 AE genau dem Abstand Erde - Sonne.

$$\frac{a_S^3}{a_E^3} = \frac{T_S^2}{T_E^2} \rightarrow a_S^3 = a_E^3 \cdot \frac{T_S^2}{T_E^2} \quad \Big| \sqrt[3]{\ }$$

$$a_S = a_E \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{T_S}{T_E}\right)^2} = 1\,AE \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{29{,}5a}{1a}\right)^2} = \underline{9{,}5\,AE}$$

Der Maler Giotto stellte 1306 nach einer Beobachtung dieses Kometen die typische Kometenform in seinem berühmten Bild "Anbetung der Könige" dar.
Halley umläuft die Sonne auf einer stark elliptischen Bahn mit einer Umlaufdauer von 76,1 a und erreicht dabei einen maximalen Abstand von der Sonne von 35,4 AE.
a) Berechne die große Halbachse seiner Bahn.
b) Skizziere seine Bahn.
c) Berechne den kleinsten Abstand von der Sonne.
d) Beurteile unter Berücksichtigung der Ergebnisse, ob Halley eine Gefahr für die Erde darstellen könnte.

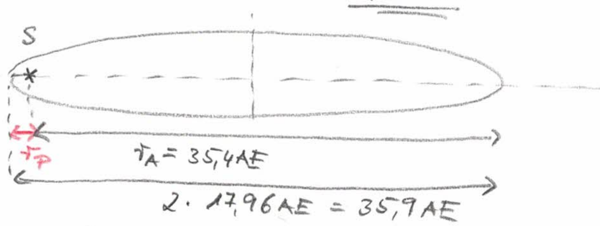
Musteraufgabe: Komet Halley



a) $$\frac{a_H^3}{a_E^3} = \frac{T_H^2}{T_E^2} \rightarrow a_H^3 = a_E^3 \cdot \frac{T_H^2}{T_E^2} \quad \Big| \sqrt[3]{\ }$$

$$a_H = a_E \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{T_H}{T_E}\right)^2} = 1\,AE \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{76{,}1a}{1a}\right)^2} = \underline{17{,}96\,AE}$$

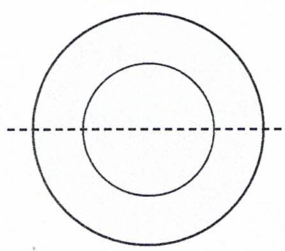
b)



c) $$r_P = 2 \cdot a_H - r_A = 35{,}9AE - 35{,}4AE = \underline{0{,}5AE}$$

d) Im Perihel ist Halley näher an der Sonne als die Erde (1AE), kann also die Erdbahn kreuzen und kollidieren (mit hoher Geschwindigkeit, Flächensatz)

Der genaue Wert der astronomischen Einheit wurde durch eine Radarmessung bestimmt.
Die Umlaufdauer der Venus beträgt 225 d.
a) Berechne den mittleren Abstand Venus-Sonne.
b) Bei der kleinsten Entfernung Erde-Venus benötigt ein Radarsignal, das von der Erde ausgesandt wird, etwa 276 s bis zur Rückkehr zur Erde. Bestimme daraus den Wert für die astronomische Einheit AE.



Übungsaufgabe: Bestimmung der astronomischen Einheit

a) $$\frac{a_V^3}{a_E^3} = \frac{T_V^2}{T_E^2} \rightarrow a_V^3 = a_E^3 \cdot \frac{T_V^2}{T_E^2} \quad \Big| \sqrt[3]{\ }$$

$$a_V = a_E \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{T_V}{T_E}\right)^2} = 1\,AE \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{225d}{365d}\right)^2} = \underline{0{,}72\,AE}$$

b) $$s = 1\,AE - 0{,}72\,AE = \underline{0{,}28\,AE}$$

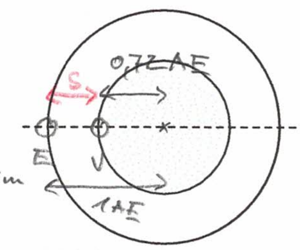
einfacher Weg

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 276s\right)$$

$$= \underline{4{,}14 \cdot 10^{10}\,m}$$

$$0{,}28\,AE = 4{,}14 \cdot 10^{10}\,m \quad | :0{,}28$$

$$\underline{1\,AE = 1{,}48 \cdot 10^{11}} = 148\ \text{Mio km}$$



Selbst-Check:
- **Sonnensystem**
- **Ellipsenbahn**
- **Flächensatz**
- **Abstandsberechnung**
- **Astronomische Einheit**

Aufgaben:

Auf Leifiphysik findet man zu diesem Thema einen schwierigen Test sowie ein paar Aufgaben unter Teilgebiet Mechanik - Weltbilder, Keplersche Gesetze - Aufgaben. Die einfachen (grünen) reichen dabei vollkommen aus.

Es ist ganz typisch für die Naturwissenschaft, dass Phänomene zuerst beschrieben und später erklärt werden. Erst ca. 1600 gelang Galilei die korrekte Beschreibung von Wurfbewegungen, bis zu deren Erklärung dauerte es weitere 70 Jahre.

2.3 Gravitationsgesetz

Entwicklung der Mechanik

Kinematik:

mathematische Beschreibung .... von Bewegungsbahnen

auf der Erde: Parabelbahn beim Wurf .... (Galilei)

am Himmel: Ellipsenbahn von Planeten .... (Kepler)

Dynamik:

physikalische Begründung .... von Bewegungsbahnen

auf der Erde: 3 Gesetze der Bewegung .... (Newton)

am Himmel: 3 Gesetze + Gravitationsgesetz .... (Newton)

Newton und der Apfel

Dass Newton die zündende Idee hatte, als ihm ein Apfel auf den Kopf fiel, gehört wohl ins Reich der Legende. Die Anekdote zeigt aber genau den Knackpunkt dieser Entwicklung: **Newton wendet seine Gesetze für irdische Bewegungen auf die Himmelsmechanik an.**

aus dem Wechselwirkungsprinzip folgert Newton, dass der Apfel die Erde ebenso anzieht wie die Erde den Apfel, das überträgt er auf das System Erde-Mond bzw. Sonne-Erde

Newton's Gravitationsgesetz

$$\boxed{F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}}$$

m: Massen

r: Abstand der Mittelpunkte

G: universelle Gravitationskonstante $6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\, s^2}$

Zunächst probieren wir die Formel gleich mal in einem naheliegenden Beispiel aus: ***Bestimme die Gravitationskraft auf eine Person (m = 50 kg) auf der Erdoberfläche und vergleiche.***

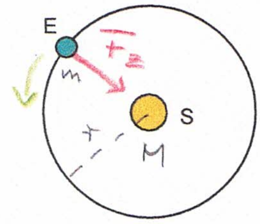
Anwendung: Erdanziehung auf eine Person auf der Oberfläche

$$F_G = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\, s^2} \cdot \frac{50\,kg \cdot 6 \cdot 10^{24}\,kg}{(6{,}371 \cdot 10^6\,m)^2} = \underline{\underline{493 \frac{kg\,m}{s^2}}} = \underline{\underline{493\,N}}$$

früher: $F_G = m \cdot g = 50\,kg \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} = \underline{\underline{491\,N}}$ ← gleich

Bestimmung der Sonnenmasse

In ihrer Grundform werden wir diese Formel nur selten benutzen, da die Massen der Himmelskörper zunächst mal nicht bekannt sind. Im Umkehrschluss ermöglicht uns die Formel aber gerade diese unbekannten Massen zu bestimmen. ***Bestimme die Masse unserer Sonne aus dem Erdumlauf.***



$$F_Z = F_G$$

$$m_E \omega^2 r = G \cdot \frac{m_E \cdot m_S}{r^2}$$ unabhängig von Erdmasse!

$$m_S = \frac{\omega^2 r^3}{G}$$

$$m_S = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \frac{r^3}{G} = \frac{4\pi^2 \cdot (1{,}49 \cdot 10^{11}\,m)^3}{(365 \cdot 24 \cdot 3600\,s)^2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}} \frac{kg\,s^2}{m^3}$$

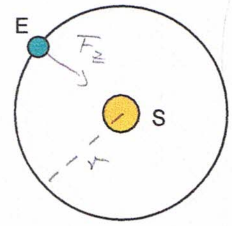
$$= \underline{1{,}97 \cdot 10^{30} = m_S}$$

Um die Masse eines Himmelskörpers zu bestimmen, benötigen wir einen zweiten .... Körper, der den ersten .... umkreist. Aus der Gleichheit von Zentripetalkraft .... und Gravitationskraft .... ergibt sich die **Masse des Zentralgestirns**, die Masse des zweiten Körpers, fliegt bei der Rechnung raus.

Beachte: *Dieses Konzept gilt in der vereinfachenden Betrachtung, dass das Zentralgestirn quasi ruht, während der zweite Körper umläuft. Sofern der zweite Körper viel leichter ist, geht das näherungsweise in Ordnung.*

Nachdem Kepler mit seinen Gesetzen "nur" die Bewegung der Planeten beschrieben hatte, gelang es Newton, das dritte Kepler-Gesetz physikalisch zu begründen.
Ermittle aus der Kräftebetrachtung des vorherigen Beispiels eine andere Darstellung des Terms T^2/r^3 aus dem dritten Kepler-Gesetz.

Newton und Kepler: Das allgemeine Kepler-Gesetz



$$F_z = F_G$$

$$m_E \omega^2 r = G \cdot \frac{m_E \cdot m_S}{r^2} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r = G \cdot \frac{m_S}{r^2} \quad | \cdot T^2 \; | : r$$

$$4\pi^2 = G \cdot m_S \cdot \frac{T^2}{r^3}$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_S} = \text{konst!}, \text{ da } m_S = \text{konst.}$$

Beachte: Der Quotient ist jeweils nur für ein Zentralgestirn konstant.
Für ein anderes Zentralgestirn ergibt sich ein anderer Wert. $\rightarrow$ FS: $\boxed{\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}}$

An Nachrichten- und Kommunikationssatelliten stellt man meist die Forderung, dass sie sich immer über demselben Bereich der Erdoberfläche befinden, um permanent für die Nutzer zur Verfügung zu stehen (z.B. Satellitenfernsehen).
Berechne die Flughöhe auf dieser "geostationären Bahn".

Anwendung: Flughöhe von Kommunikationssatelliten

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_E}$$

$$\frac{T^2}{4\pi^2} \cdot G \cdot m_E = r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{T^2}{4\pi^2} \cdot G \cdot m_E}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(24 \cdot 3600\,s)^2}{4\pi^2} \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\,s^2} \cdot 6 \cdot 10^{24}\,kg}$$

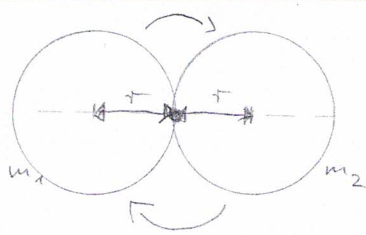
Richtungen von F_z und F_G unterschiedlich

$$r = 4{,}2 \cdot 10^7\,m$$

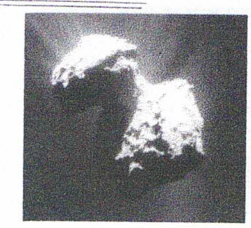
Flughöhe: $h = r - r_E = 4{,}2 \cdot 10^7\,m - 6{,}371 \cdot 10^6\,m = 3{,}6 \cdot 10^7\,m$
$= 36 \cdot 10^3\,km$

Im Abitur 2016 tauchte eine knifflige Kräftebetrachtung zum Kometen Tschurjumow-Gerasimenko auf, die wir an dieser Stelle lösen können:
"Die Gestalt des Kometen TG kann durch zwei Kugeln vom Radius 1,4 kn modelliert werden, die über ein Zwischenstück mit vernachlässigbaren Ausmaßen verbunden sind. Senkrecht auf dem Zwischenstück steht die Rotationsachse um die sich der Komet einmal in 12,4 h dreht. Es wird angenommen, dass sich die Masse 1,0 · 10^{13} kg gleich auf beide Kugeln verteilt. Durch Ausgasen des Kometen in Sonnennähe besteht die Möglichkeit, dass das Zwischenstück bricht. Untersuchen Sie auf Grundlage des obigen Modells, ob die beiden Kometenhälften dann auseinanderdriften würden."

Übungsaufgabe: Zusammenhalt eines Kometen



besser rechts unten



$$F_z = m_1 \omega^2 r = m_1 \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r = 0{,}5 \cdot 10^{13}\,kg \cdot \frac{4\pi^2 \cdot 1400\,m}{(12{,}4 \cdot 3600\,s)^2}$$

$$= 1{,}39 \cdot 10^8\,N$$

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{(2r)^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg\,s^2} \cdot \frac{(0{,}5 \cdot 10^{13}\,kg)^2}{(2800\,m)^2}$$

Gravitation hält Komet zusammen!

$$= 2{,}1 \cdot 10^8\,N > F_z$$

Selbst-Check:
- **Newton und der Apfel**
- **Bestimmung der Sonnenmasse**
- **allgemeines Keplergesetz**
- **geostationäre Bahn**

Aufgabe:

Auf Leifiphysik findet man hierzu zwei Tests sowie einige Aufgaben unter Teilgebiet Mechanik - Gravitationsgesetz und -feld - Gravitationsgesetz von Newton – Aufgaben. Die leichten (grünen) reichen völlig aus.

Die Entdeckung der Galaxienflucht bildet die Grundlage für die Urknalltheorie (Big Bang Theory) und damit für unser aktuelles Bild von der Entwicklungsgeschichte des Universums.
Nach Edwin Hubble ist auch das erste nicht-erdgebundene Teleskop benannt, das heute aus dem Orbit perfekte Aufnahmen von weit entfernten Sternen und Galaxien liefert.

2.4 Kosmologie

Galaxienflucht:

Edwin Hubble bestimmte 1924 mit Hilfe der δ-Cepheiden (pulsierende Sterne)

die Abstände zahlreicher Galaxien,

für die zuvor Vesto Slipher bereits die Geschwindigkeit

mit Hilfe des Doppler-Effekts gemessen hatte.

Auf Basis der groben Datenlage vermutete er, dass sich Galaxien

umso schneller von uns weg bewegen

je weiter sie entfernt sind.

$$\boxed{v = H_0 \cdot r}$$

v: Geschwindigkeit
r: Abstand
H_0: Konstante

Die Hubble-Beziehung erlaubt die Entfernungsbestimmung von Galaxien

aufgrund ihrer Geschwindigkeit.

Der Proportionalitätsfaktor H_0 (Hubble-Konstante) konnte in den letzten Jahren immer genauer bestimmt werden:

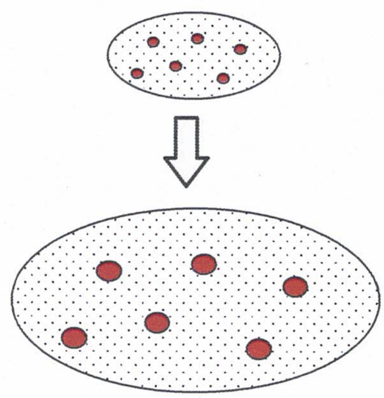
kosmische Entfernungseinheit

2010: $H_0 = 72 \pm 8 \frac{km}{s}$ pro Mpc (Mega-Parsec)

(H hat sich in Laufe der Entwicklungsgeschichte des Universum tatsächlich verändert, mit H_0 wird ihr aktueller Wert bezeichnet)

Die Interpretation der Galaxienflucht als Ausdehnung des Raumes wirkt für uns etwas künstlich, da wir aus der Alltagserfahrung lieber mit einer Bewegung der Galaxien in Bezug auf den Raum argumentieren würden. Die moderne Interpretation impliziert vor allem, dass der Raum (und auch die Zeit) erst entstanden sind (wobei dieser Prozess immer noch andauert). Die Hintergrundstrahlung, die einem schwarzen Körper von 3 K Temperatur entspricht, ist quasi der feinverteilte Rest der Explosion.

Expansion des Universums:



Die von Hubble gefundene Galaxienflucht fand eine vorläufige Interpretation im Paradigmenwechsel durch Lemaitre:
Die Galaxien bewegen sich nicht etwa innerhalb eines statischen Raumes,

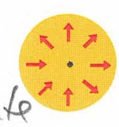
der Raum selbst dehnt sich aus.

(dadurch nimmt der Abstand der Galaxien zu → Rosinenkuchenmodell/Luftballonmodell).

The Big Bang Theory:

Idee: Man könnte den von Hubble beobachteten Expansionsprozess

in der Zeit zurück verfolgen.



Ergebnis: Ausgangspunkt der Expansion war ein

ein Punkt (Singularität) unendlich hoher Energiedichte

Interpretation: Start des Universums als „Urknall" (allerdings still).

"Nachhall": 3K*-Hintergrundstrahlung in allen Raumrichtungen messbar (Strahlung wie ein 3K-kühler Körper)

* K = Kelvin (Temperatureinheit)

Die Bestimmung des Alters des Universums ist überaus simpel (wenn man das Verfahren kennt). Hier wird deutlich, wie wichtig es für die Astronomen ist, die Hubble-Konstante möglichst genau zu bestimmen. Wir gehen aber davon aus, dass diese selbst nicht konstant über die Zeit war.

Das Alter des Universums

Die Expansionszeit lässt sich leicht aus den Abständen und Geschwindigkeiten von Galaxien berechnen, das Hubble-Gesetz führt dann zu einer interessanten Schlussfolgerung:

$$\left.\begin{array}{l} v = \frac{r}{t} \\ v = H_0 \cdot r \end{array}\right\} \frac{r}{t} = H_0 \cdot r \to \frac{1}{t} = H_0 \to t = \frac{1}{H_0}$$

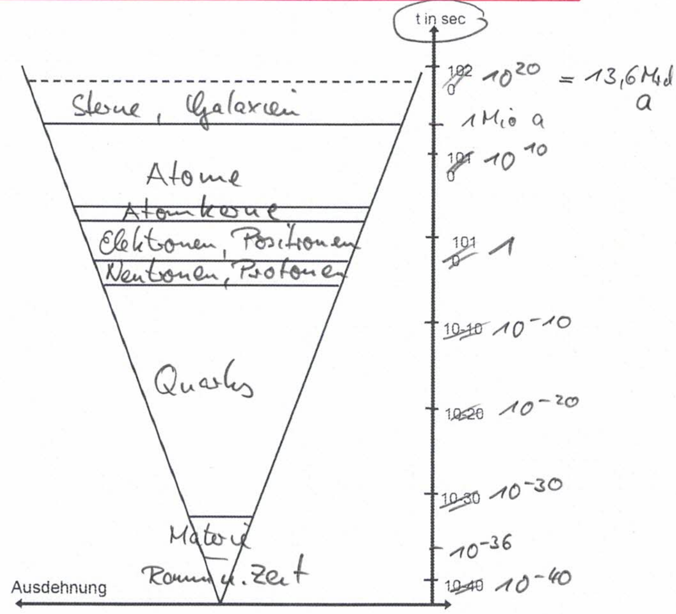
$$t = \frac{1 \cdot s \cdot Mpc}{72\,km} = \frac{1s \cdot 10^6 \cdot 3{,}086 \cdot 10^{13}\,km}{72\,km} = \underline{\underline{13{,}6\ Mrd.\,a}}$$

Das Alter des Universums ist der Kehrwert der Hubble-Konstanten .

Aus den Beobachtungen des Universums und den physikalischen Theorien, die wir an Hand von Experimenten auf der Erde entwickelt haben, ergibt sich mittlerweile ein sehr umfassende Bild der kosmologischen Entwicklung. Im Dunkeln liegen noch die ersten Bruchteile von Sekunden.

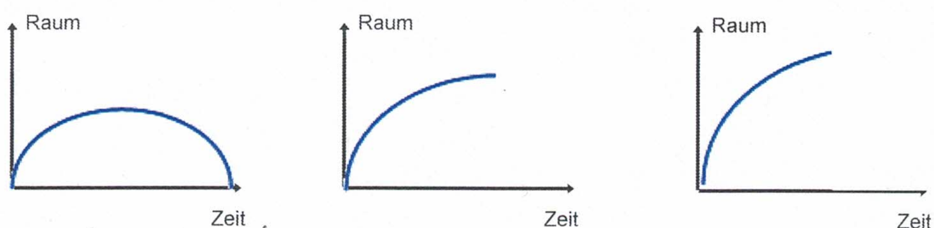
Die Entwicklung des Universums

Die Strukturen, die wir heute im All beobachten können, haben sich erst im Laufe der Zeit aus der Energie des Urknalls entwickelt. Typisch dafür ist, dass zu Beginn zunächst die kleinsten Teilchen entstanden sind und nach und nach daraus immer größere Objekte wurden.
Beachte die **logarithmische Zeitskala in der Graphik**.



Der russische Mathematiker Friedmann modellierte basierend auf der Gravitationskraft und der kinetischen Energie drei mögliche Szenarien für die räumliche Entwicklung des Universums. ***Beschreibe die in den Diagrammen dargestellten räumlichen Entwicklungen.***

Weitere Entwicklung des Universums: Die Friedmann-Modelle



Ausdehnung kommt durch Gravitation zum Stillstand. Universum fällt in sich zusammen → neue Singularität

Ausdehnung strebt gegen einen Grenzwert

Ausdehnung wird immer größer. Prozess verlangsamt sich dabei

Durch aktuelle Messungen konnten alle drei Modelle widerlegt werden.

Tatsächlich wird die Expansionsgeschwindigkeit immer größer .
(Erklärung mit "dunkler Energie").

↯ zu Gravitation

Selbst-Check:
- **Galaxienflucht und Hubble-Gesetz**
- **Expansion des Universums und Urknall**
- **Alter des Universums**
- **Entwicklung des Universums**

Nachbereitung:

Wie wär's mit einer Folge Big-Bang-Theory? ☺