

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

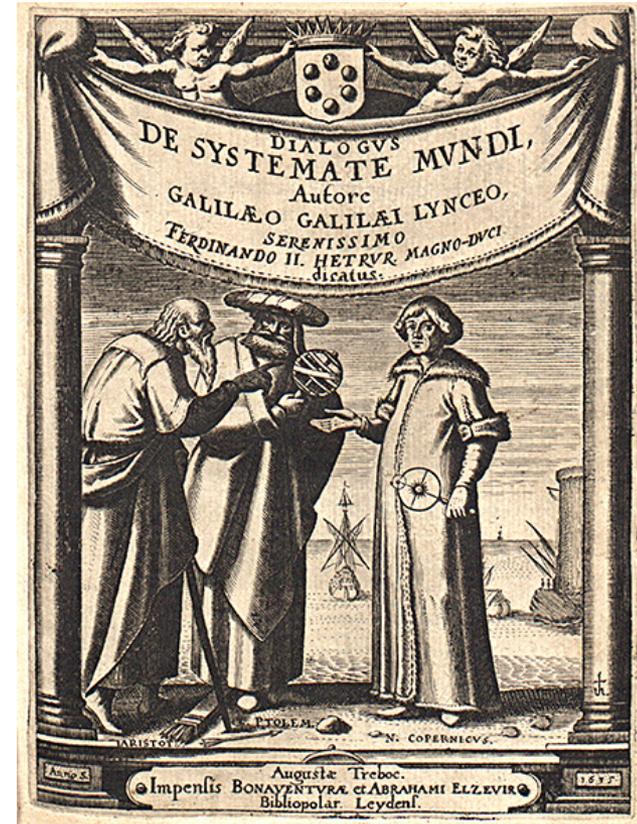
1.3 Ptolemäus

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

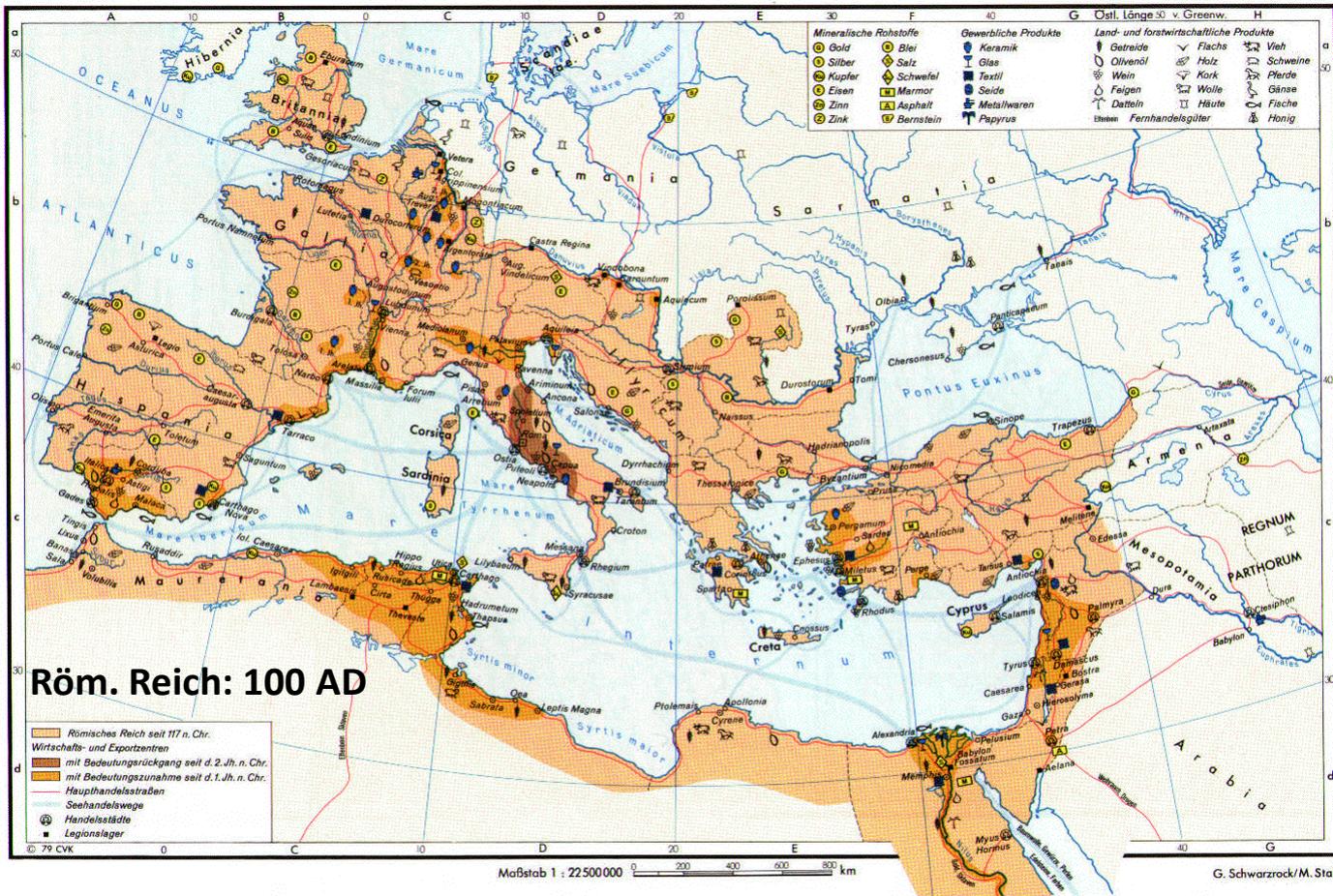
1.5 Die kopernikanische Revolution

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)



Hochkulturen im Mittelmeerraum

Mesopotamien, Ägypten: 3000 v.Chr. – 300 v.Chr.

Griechenland /Röm. Reich: 800 v.Chr. – 500 n.Chr.

Arabisches Reich : 700 n.Chr. – 1450 n.Chr.

Warum beobachtete man die Sterne am Himmel ?

ANTIKE (ca. 3000 v.Chr. - 300 n.Chr.)

Ägypten, Mesopotamien (ca. 3000 – ca. 500 v. Chr.)

Kalender u.a. für die Landwirtschaft (z.B. Sirius), Astrologie, Navigation?

Griechenland/Hellenismus /Römer (ca. 500 v. Chr. – 300 n.Chr.):

wissenschaftliche Neugier, Astrologie?, Navigation?

MITTELALTER (300 n.Chr. – 1450 n.Chr.)

Arabische Reiche (ca. 700 – ca. 1450)

wissenschaftliche Neugier, Landvermessung, Astrologie?

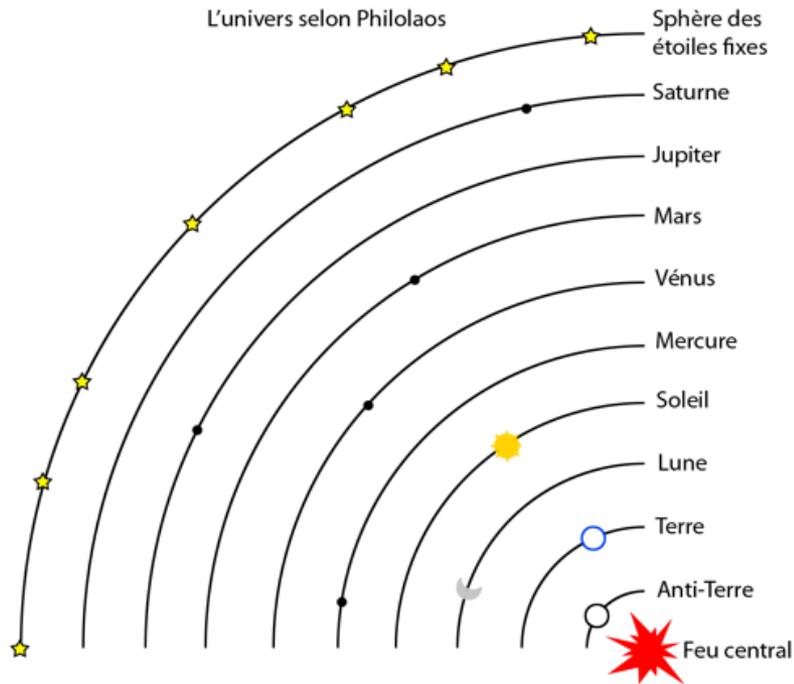
Westeuropa (ca. 1000 – 1450)

wissenschaftliche Neugier, Navigation, Astrologie?

EUROPÄISCHE NEUZEIT (1450 – Heute)

wissenschaftliche Neugier, Kalender, Navigation

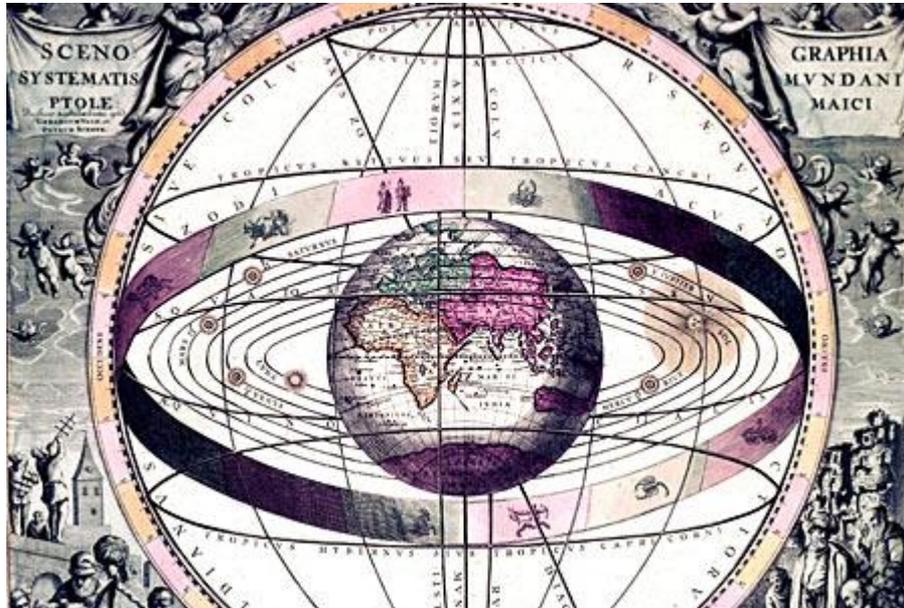
Das Planetensystem nach Philolaos (ca. 470-400 v.Chr.) aus der Schule des Pythagoras (ca. 570 – 510 v.Chr.)



Anordnung der Planeten:
Radius wächst mit der
Umlaufzeit, jedenfalls für die
äußeren Planeten.

Man beachte: Nicht die Erde, sondern ein Zentralfeuer (das aber nicht die Sonne ist) steht im Mittelpunkt dieses Systems.

„Zwei-Kugel Modell“ des Planetensystems Aristoteles 384 – 322 v. Chr.



Die zwei Kugeln sind die Erdkugel und die Kugelschale, auf der die Fixsterne befestigt sind. Dazwischen bewegen sich die Planeten (einschließlich Sonne und Mond). Die irdische Physik spielt sich in der sublunaren Welt ab und ist von der himmlischen Physik verschieden.

Das Zwei-Kugel Modell war das Standard Modell während der zwei Jahrtausende von Aristoteles bis Kopernikus.

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

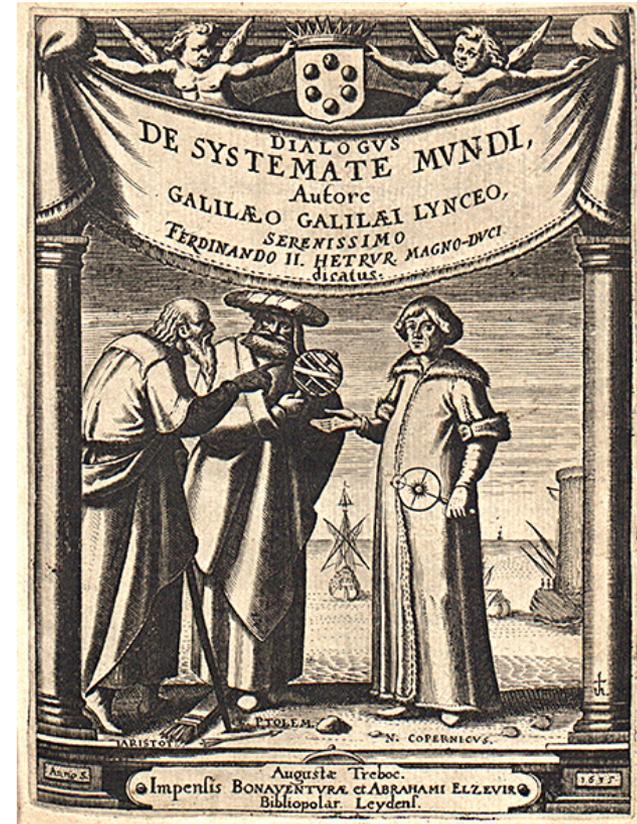
1.3 Ptolemäus

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

1.5 Die kopernikanische Revolution

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)

Entfernungs- und Größenmessungen durch Aristarch und Eratosthenes

Aristarch von Samos, ca. 310 - 230 v. Chr.

Verhältnis der Entfernungen und Größen von Sonne und Mond

Größenverhältnis von Mond und Erde

Mondentfernung in Erdradien

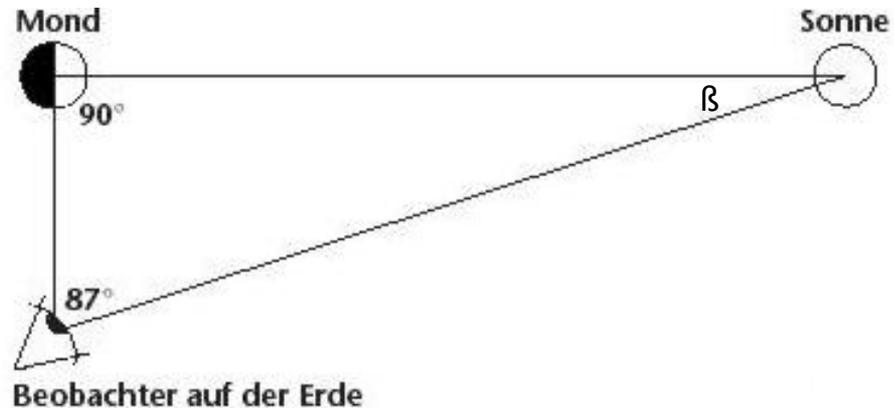
Eratosthenes von Kyrene, ca. 275 - 194 v. Chr.

Messung des Erdumfangs

Das Verhältnis der Größen und Entfernungen von Mond und Sonne



Aristarch, 310 – 230 v. Chr.



Aristarch bestimmte den Winkel β zwischen Erde, Sonne und Halbmond zu maximal 3° .

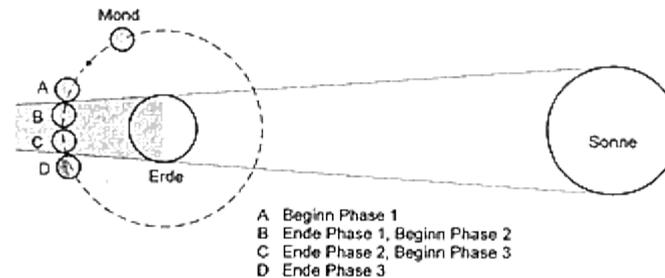
Daraus folgt: $d_{ES}/d_{EM} = 1/\sin 3^\circ = 19$ (heutiger Wert: 390)

Da Mond und Sonne gleich groß am Himmel erscheinen, schloss Aristarch, dass die Sonne mindestens 19 mal größer als der Mond ist.

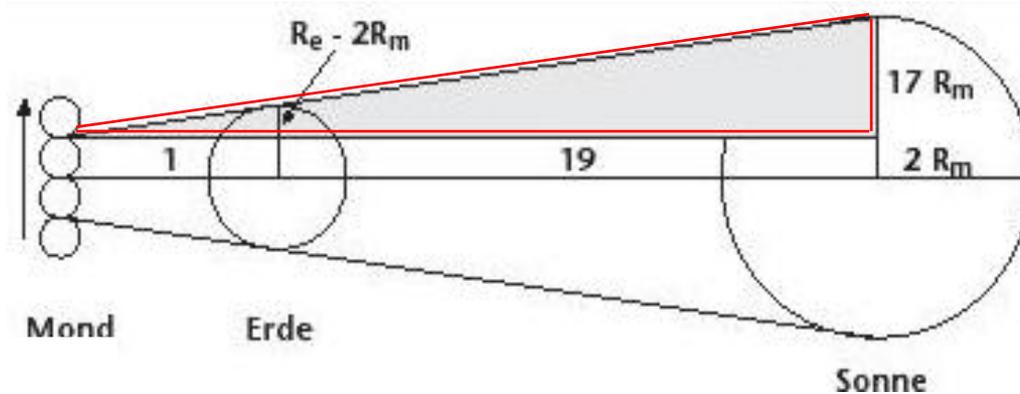


Totale Sonnenfinsternis

Eine Mondfinsternis ermöglicht, das Verhältnis von Erd- zu Mondgröße zu bestimmen.



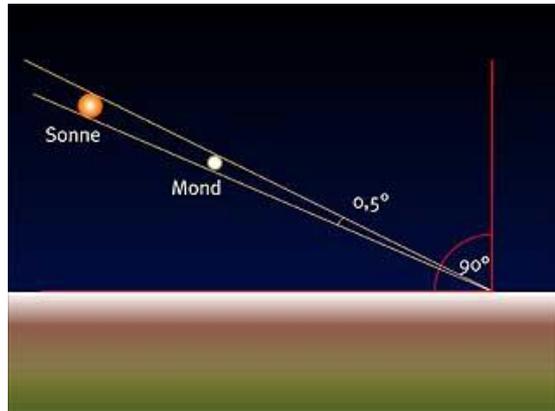
Zeitlicher Verlauf einer totalen Mondfinsternis



Aristarch beobachtete, dass der Mond in etwa genauso lange braucht, um vollständig in den Erdschatten einzutauchen, wie er danach benötigt, bis sein Rand wieder sichtbar wird.

$$\text{Daraus erhält man: } (R_E - 2 R_M) : 17 R_M = 1 : 20 \rightarrow R_E = 2,9 R_M$$

Mondentfernung in Erdradien



Sonne und Mond erscheinen am Himmel unter einem Winkel von ca. $0,5^\circ$. Man kann den Mond z.B. durch einen in 1 m Entfernung gehaltenen Gegenstand von 1 cm Breite abdecken.

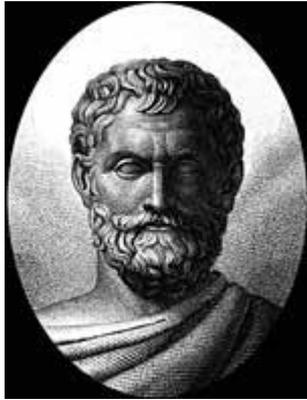
$$d_{EM} : 1\text{m} = 2 R_M : 1\text{cm} \quad \rightarrow \quad d_{EM} = 100 \cdot 2R_E / 2.9$$

$$d_{EM} = 69 R_E$$

Der heutige Wert liegt bei etwa 60 Erdradien.

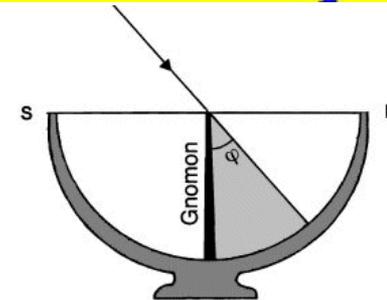
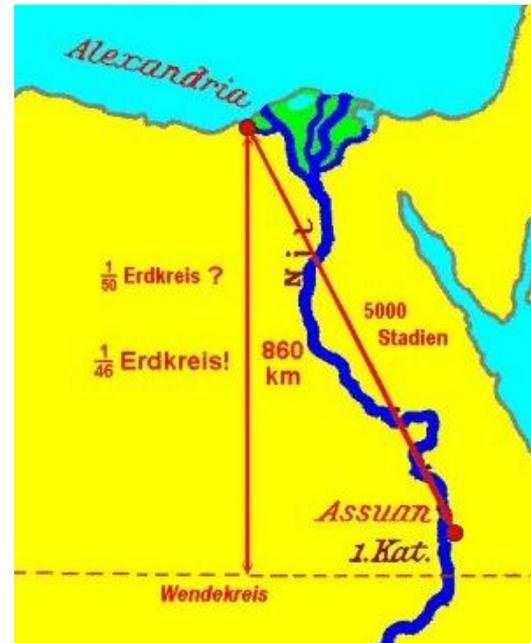
Mit dem von Eratosthenes gemessenen Wert des Erdumfangs kann man dann die Entfernung Erde-Mond in Stadien bzw. nach Umrechnung auch in km angeben.

Eratosthenes misst den Erdumfang



1 olympische Stadie = 185 m
 1 ägyptische Stadie = 157 m

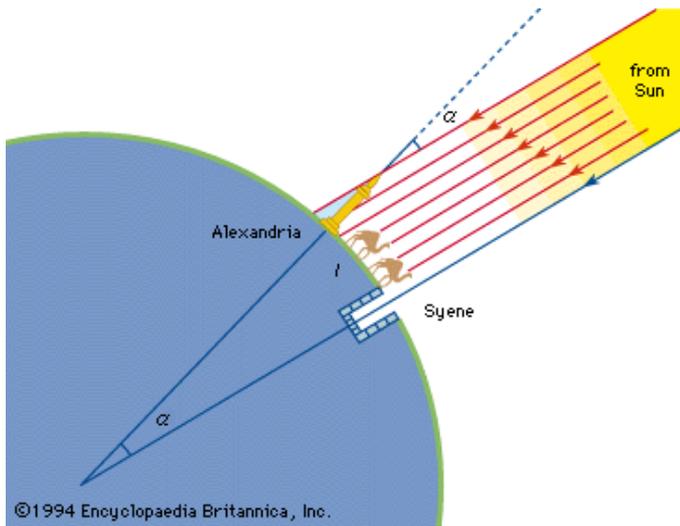
Eratosthenes, ca. 276 – 195 v. Chr



Skaphe, ein Gerät zur Winkelmessung:
 Gemessener Bogen = 1/50 des Umfangs;
 das entspricht einem Winkel von 7,2°

Damit ergibt sich: $5000 \text{ Stadien} : 2 \pi R_E = 1 : 50$

Erdumfang = $2 \pi R_E = 250.000 \text{ Stadien} = 39250 \text{ km}$



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

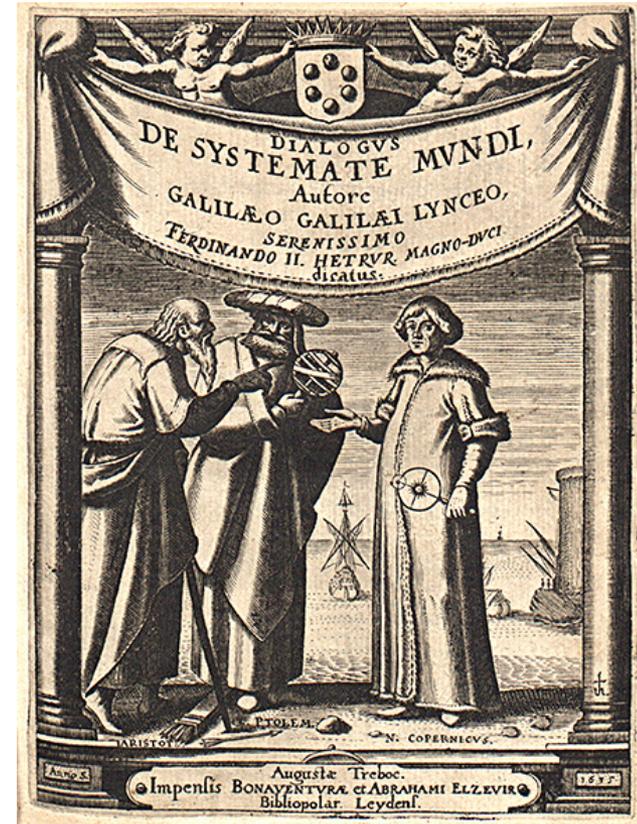
1.3 **Ptolemäus**

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

1.5 Die kopernikanische Revolution

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)



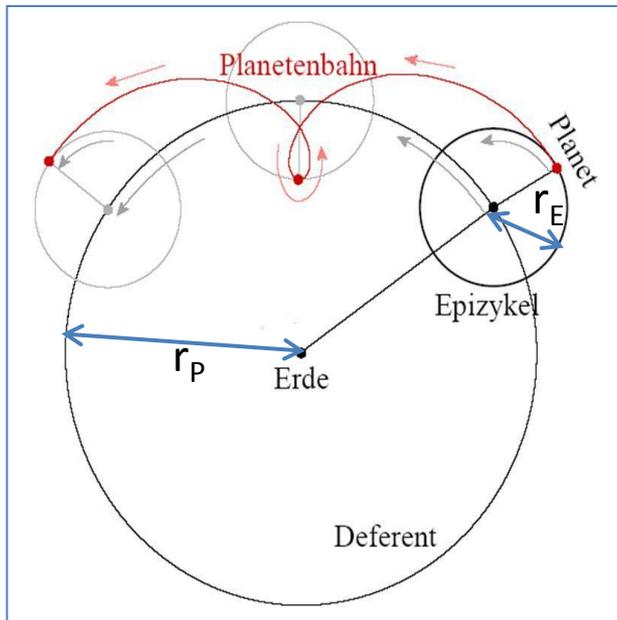
Ptolemäus geführt von der
Muse der Astronomen
(Stich 1508)

Claudius Ptolemäus (ca. 90 – ca.168 n.Chr.)

Astronom, Mathematiker, Geograph, Astrologe
arbeitete als Bibliothekar an der Bibliothek in
Alexandria

Hauptwerk: *Mathematike Syntaxis*
(„mathematische Zusammenstellung“),
später genannt: *Megiste Syntaxis*
(„größte Zusammenstellung“),
heute *Almagest* (abgeleitet vom Arabischen
al-mağisṭī) , eine Abhandlung zur Mathematik
und Astronomie in 13 Büchern.

Die scheinbare Bewegung von Planeten auf Epizyklen



Erde bzgl. Sonne: $X_E(t) = r_E \cdot \exp(i \omega_E t)$

Planet bzgl. Sonne: $X_P(t) = r_P \cdot \exp(i (\omega_P t + \phi))$

Planet bzgl. Erde:

$$X_{EP}(t) = X_P(t) - X_E(t) \\ = r_P \cdot \exp(i (\omega_P t + \phi)) - r_E \cdot \exp(i \omega_E t)$$

Deferent

Epizykel

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

1.3 Ptolemäus

1.4 **Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter**

1.5 Die kopernikanische Revolution

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)

Astronomische Forschung im islamischen und christlichen Mittelalter (ca. 300 – ca. 1450 n.Chr.)

Keine grundlegenden Fortschritte, weil

- a. die politischen Verhältnisse im Mittelmeerraum turbulent waren.
- b. die neuen monotheistischen Religionen (Christentum und Islam) umfassende Erklärungen der Welt beanspruchten und
- c. die Ausbildung der Theologien intellektuelle Kräfte banden.

Verbesserungen am ptolemäischen System durch einige neuere Beobachtungen, im Wesentlichen im arabischen Kulturraum und an den westeuropäischen Universitäten.

Der Beitrag der Astronomen im Mittelalter bestand hauptsächlich darin, das vorhandene Wissen der Antike aus dem griechischen, dem persischen und indischen Erbe zu sammeln, durch geeignete Übersetzungen zugänglich zu machen, es geistig zu verarbeiten (u.a. mit den theologischen Aussagen zu vereinbaren) und einige neue Überlegungen und Messungen hinzuzufügen.

Bewahrung und Weitergabe von Wissen

Bibliothek von Alexandria plus Museion (Forschungsstätte)

Gegründet ca. 300 v.Chr., Bestand über 500 000 Rollen

Teilweise bzw. vollständige Zerstörungen

1. 48 v.Chr. : Eroberung Ägyptens durch Caesar
2. 391 n.Chr.: Edikt des Patriarchen von Alexandria
3. 691 n.Chr.: Eroberung Ägyptens durch den Kalifen

Bibliothek von Konstantinopel etwa 300 -1200 n.Chr., Sammlung von Schriften

Akademie von Gundischapur (Iran) etwa 300 – 800 n.Chr., Sammlung und Übersetzungen auch indischer und chinesischer Texte

Haus der Weisheit (Bagdad) 825 – 1258n.Chr., Bibliothek u. Observatorium , Sammlung und Übersetzungen antiker Texte ins Arabische, darunter das Hauptwerk des Ptolemäus (Almagest)

Übersetzer“schule“ von Toledo ca. 1100 – 1300 n.Chr.: u.a. Übersetzung des Almagest aus dem Arabischen ins Lateinische um 1150

Gründung der Universitäten: Bologna (1088), Oxford (1170), Paris (1215)...Krakau (1364)... Heidelberg (1386)....



Observatorium der Ulugh Beg in Samarkand



Nikolaus von Oresme (1330 – 1382)
Prof. Collège de Navarra in Paris
und später Bischof von Lisieux



Marsilius von Inghen (1335 – 1396)
Philosoph, Rektor der Univ. Paris,
1386 Gründungsrektor der Univ.
Heidelberg, las über die Physik des
Aristoteles, später erste Promotion in
Theologie in Heidelberg

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

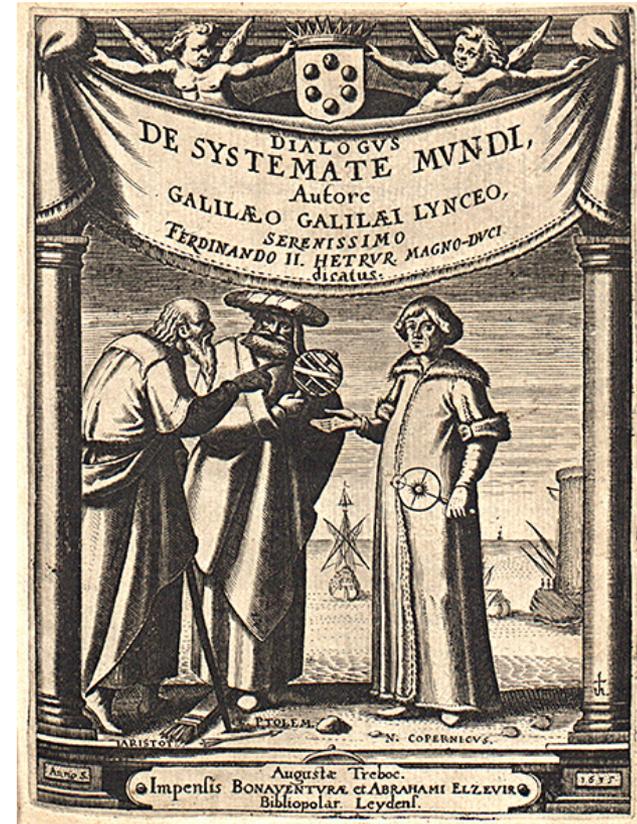
1.3 Ptolemäus

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

1.5 **Die kopernikanische Revolution**

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)

Die Erforschung des Planetensystems - Kopernikus

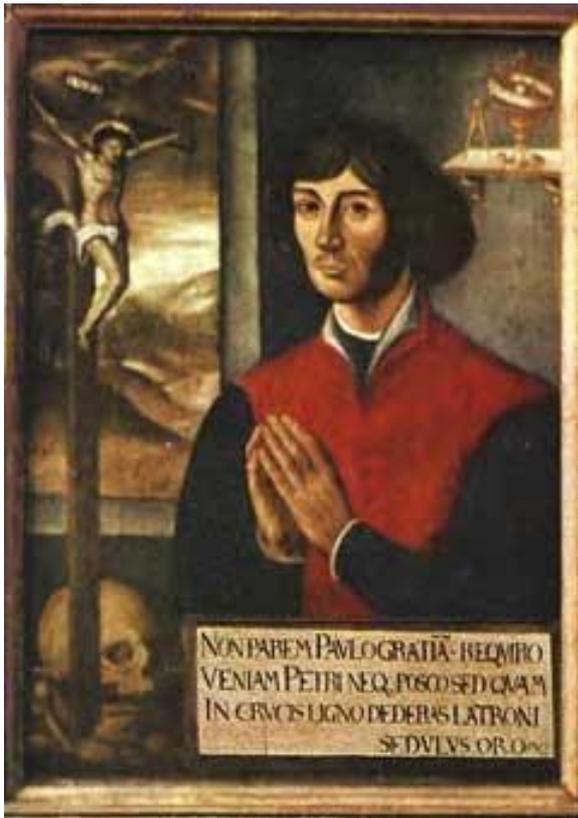
- Überblick über sein Leben und Wirken
- Seine Studien
- Das Leben als Domherr
- Wie kam er zum heliozentrische Weltsystem?
- Die Veröffentlichung seiner Ergebnisse
- Folgerungen



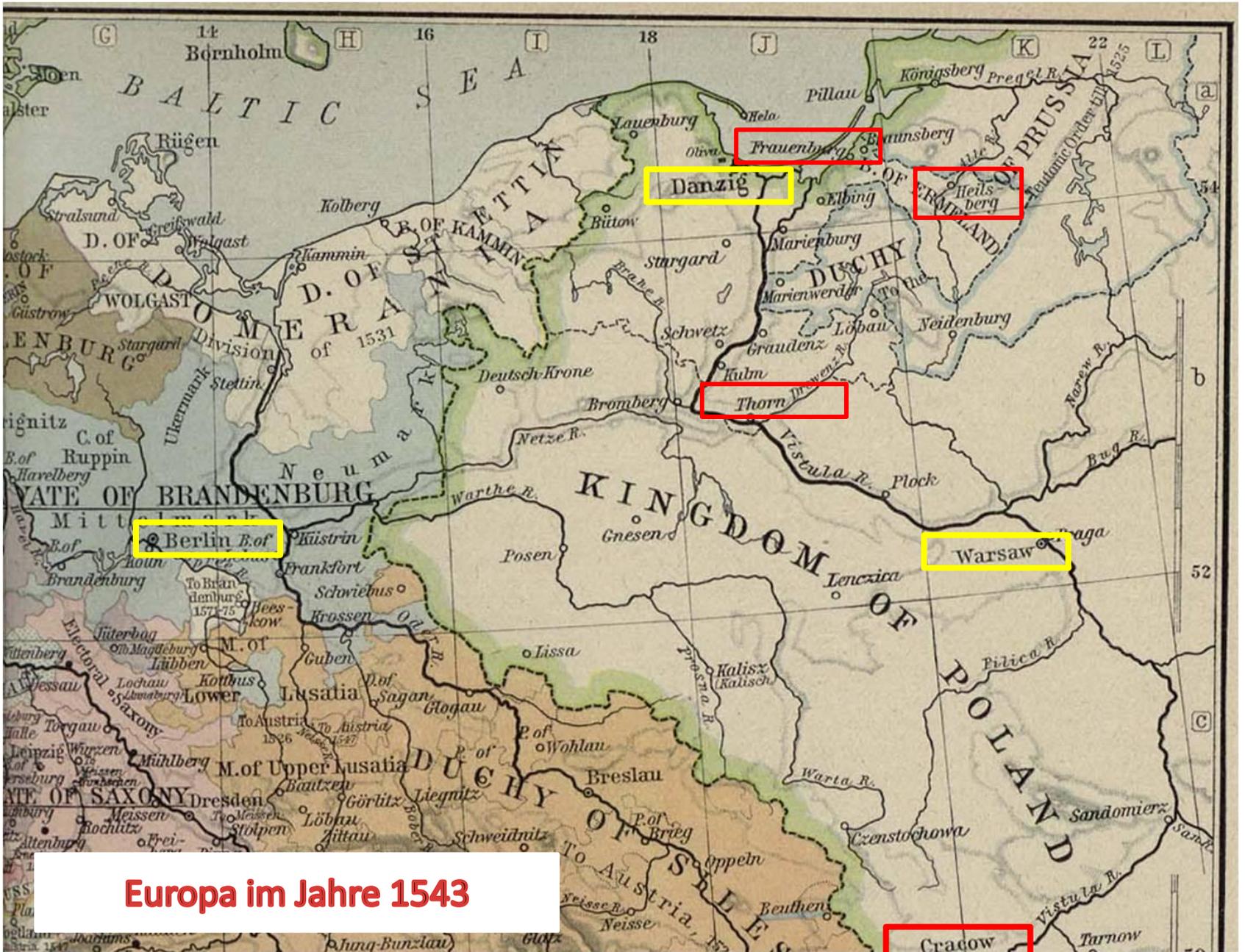
Kopernikus-Haus in Thorn
(Rechtes Gebäude)

Nikolaus Kopernikus (1473 – 1543)

Historisches Umfeld: Columbus entdeckt Amerika (1492)
Luthers Thesenanschlag (1517)



- 1473 Geboren in Thorn an der Weichsel, früher Tod von Mutter und Vater
- 1491 - 1503 Studium der freien Künste, des Kirchenrechts und der Medizin in Krakau, Bologna, Padua und Ferrara
- Ab 1512 Domherr in Frauenburg
- um 1514 Vorstellung des heliozentrischen Systems im „Commentariolus“,
- 1529 – 1542 Arbeit an seinem Hauptwerk „De revolutionibus orbium coelestium“
- 1543 Kopernikus stirbt kurz nachdem er sein gedrucktes Werk in Händen gehalten hatte.



Europa im Jahre 1543

Studien des Kopernikus

- 1491-1495 Studienbeginn an der Artistenfakultät der renommierten Universität Krakau
- 1496-1500 Studium des Kirchenrechts an der Universität Bologna
Nebenher u.a. Beschäftigung mit der Astronomie
- Ab 1501 Studium der Medizin an Universität Padua, gleichzeitig Abschluss seines Jurastudiums
- 1503 Promotion zum Doctor iuris canonici in Ferrara
Danach Heimkehr in seine Heimat nach Ermland

Kopernikus als Domherr zu Frauenburg

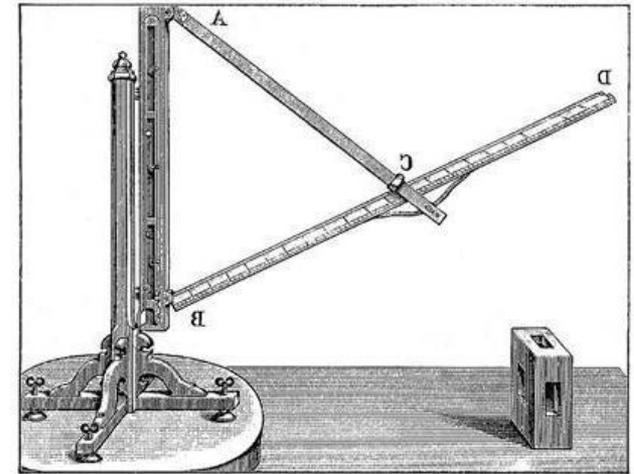
- 1483 Nach dem Tode beider Eltern wird der Bruder der Mutter, Domherr Lucas Watzenrode, Vormund der 4 Kinder.
- 1489 Watzenrode wird Fürstbischof des Ermland
- 1497 Noch während des Studiums wird Kopernikus zum Domherrn am Dom zu Frauenburg ernannt.
- 1503 Nach seiner Rückkehr aus Italien wird er persönlicher Begleiter, Arzt und Sekretär seines Onkels
- 1512 Nach dessen Tod tritt Kopernikus das Amt des Domherrn an.

Burg Heilsberg

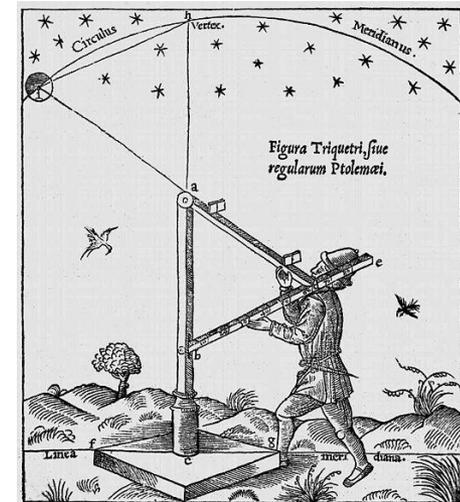


Burg Heilsberg, Residenz des Fürstbischofs, geistliches Zentrum und Sitz der Landesverwaltung des Ermlandes. Hier verbrachte Kopernikus in den Jahren 1503 – 1512 einen Großteil seiner Zeit.

Der Frauenburger Dom, die Beobachtungsstätte von Kopernikus, und sein Instrument



Der Dreistab des Kopernikus, den
später auch Tycho Brahe benutzte.



Auch Ptoleäus arbeitete schon
mit einem Dreistab

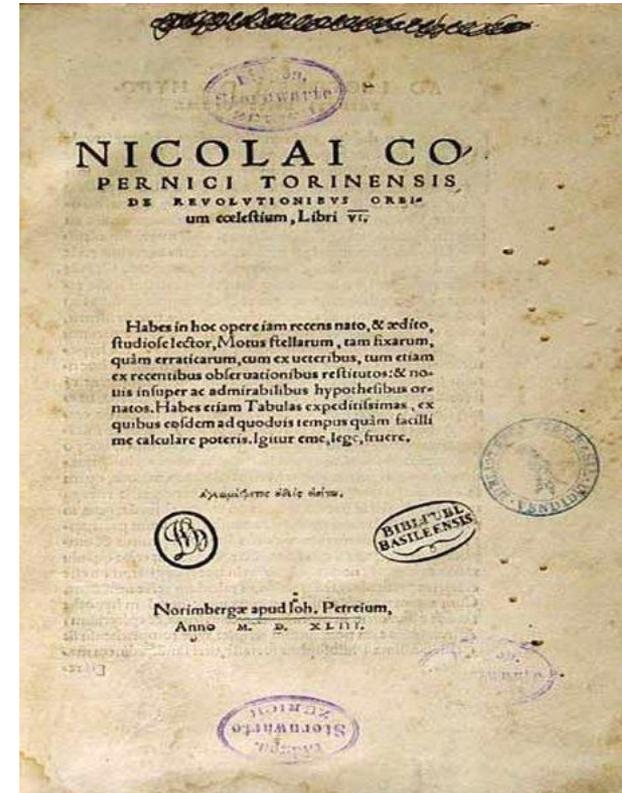
Wie kam Kopernikus zum heliozentrischen System?

(Aus dem Widmungsschreiben an Papst Paul III.)

- Die Mathematiker [Befürworter eines geozentrischen Systems] waren sich bei ihren Untersuchungen, die Bewegungen der Himmelskörper zu beschreiben, nicht einig.
- Bei ihnen herrschte eine solche Ungewissheit über die Bewegung der Sonne und des Mondes, so dass sie die Jahreslänge weder ableiten noch beobachten konnten.
- Es wurden verschiedene Grundsätze für die Beschreibung der Bewegungen der Wandelsterne angewandt (konzentrische Kreise, exzentrische und epizyklische Kreise).
- Verschiedene Methoden widersprachen dem Grundsatz der gleichförmigen Kreisbewegung.
- Das Studium antiker Schriften mit dem Ziel, andere Möglichkeiten zur Beschreibung der Planetenbewegungen zu finden.

Der Weg zu seinem Hauptwerk „De Revolutionibus“

- Ab 1512 Neben der Arbeit als Domherr
Beschäftigung mit der Astronomie
- um 1514 Verteilung des „Commentariolus“, in
dem das heliozentrische System
vorgestellt wird.
- 1529 – 1531 Fertigstellung der 1. Version seines
Werkes „De Revolutionibus...“
- 1539 Rheticus veröffentlicht eine
Zusammenfassung.
- 1542 Beginn des Drucks von „De
Revolutionibus“ in Nürnberg
- 1543 Kopernikus erleidet einen Schlaganfall
und stirbt.



Titelblatt von "De Revolutionibus" aus dem Jahre 1543

In Griechisch ist darauf das angebliche Motto der Platonischen Akademie zu lesen:

„Ohne Kenntnis der Geometrie soll keiner eintreten.“

Nicolai Copernici

de Hypothesibus motuum caelestium
a se constitutis

commentariolus.

Multitudinem orbium caelestium Maiores nostros
cum maxime ob causam passim uideret, ut apparenti
in sideribus motuum sub regularitate saluarent.
Valde n. absurdum uidebatur coeleste corpus in
absolutis submittente non semper aequi moueri.
Fieri aut posse aduocant, ut et compositione
atq; conuersione motuum regularium diuersimode
ad aliquem situm moueri quippam uideretur.
Id quod Calippus & Eutychus p. concentricos
orbiculos deducere laborantes non potuerunt.
Et his cum in motu siderum recedere rationem
ad solum orbem que circa reuolutiones siderum
uidentur, uerumtamen quod sidera motu semper
dece in sublime, modo de cedere nobis uidentur,
quod concentricis minime sustinet. Itaq; pot
ex sententia uisa est p. eccentricos & epicyclos
id agi, in qua uerum maxima pars sapientum
consensit, affirmati que ab Ptolemeo et pleriq;
alijs passim de his prolata fuerunt, quando ad motum
reponderent, non paruum quod uidebant
habere

MS.
PHIC.

IX.

quam ob se praedictum, fieri possit si nobis aliqua pe
titiones, quas axiomata dicunt, concedantur, quae
hoc ordine sequuntur. PRIMA PETITIO.

1. Omnium orbium caelestium, siue sphaerarum unum
centrum non esse.
 2. Centrum terrae, non esse centrum mundi, sed tantum
gravitatis et orbis Lunarum.
 3. Omnes orbis ambire Solem tantum in medio omnium
existentem, ideoq; circa Solem esse centrum mundi.
 4. Minorem esse comparationem distantiarum Solis
& terrae ad altitudinem firmamenti, quam semi
diameteris terrae ad distantiam Solis, adeo ut sit
ad summitatem firmamenti in se sitibilibus.
 5. Quicquid ex motu apparet in firmamento, non esse
ex parte ipsius, sed terrae. Terra igitur non praeci
pius elementis motu diuerso tota commouetur, in
partibus suis inuariabilibus firmamento immobili pro
minente ac ultimo caelo.
 6. Quicquid nobis ex motibus circa Solem apparet in
esse occasione ipsius, sed telluris & partium orbis, in
quo inuoluamur seu aliquo alio sidere. Sed
terram pluribus modis fieri.
 7. Quod apparet in Erratis retrogressio ac progressus
non esse ex parte ipsarum, sed telluris. Huius igitur
Solis motus tot apparentibus in caelo diuersitatibus
sufficit.
- Hic igitur sic praemis tanquam breuiter este
dere, quam ordinate regularitas motuum fieri possit.
Atque autem breuitatis causa mathematicas demon
strationes omittendas arbitratus sum, uicarij uolu
mini

Blatt 34 des Manuskriptes 10530 aus der
Österreichischen Nationalbibliothek mit dem
Titel Nicolai Copernici de hypothesibus motuum
coelestium a se constitutis commentariolus

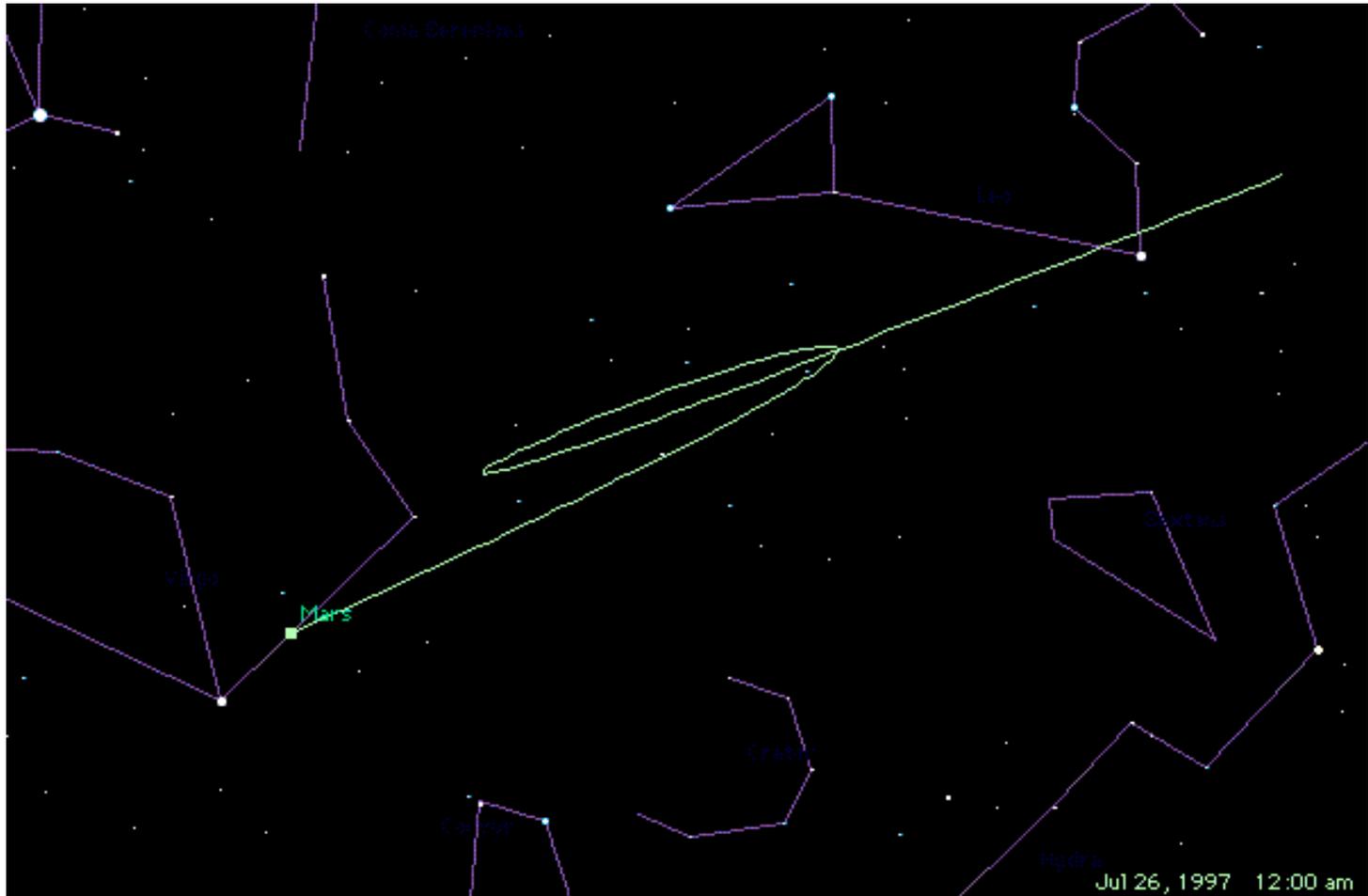
Die 7 von Kopernikus aufgestellten Axiome

Commentariolus (um 1510)

Hierin fasste Kopernikus seine Gedanken in Form von Axiomen (Petitiones) zusammen, die folgende Punkte behandeln:

- 1) Die Lage der Bahnmittelpunkte der Himmelskörper
- 2) Die Bedeutung des Erdmittelpunktes
- 3) Die Sonne als Zentrum aller Bahnkreise
- 4) Die Entfernung des Fixsternhimmels
- 5) Die Drehung der Erde um ihre Achse
- 6) Die scheinbare Bewegung von Sonne und Planeten
- 7) Die Rückwärtsbewegung der Planeten

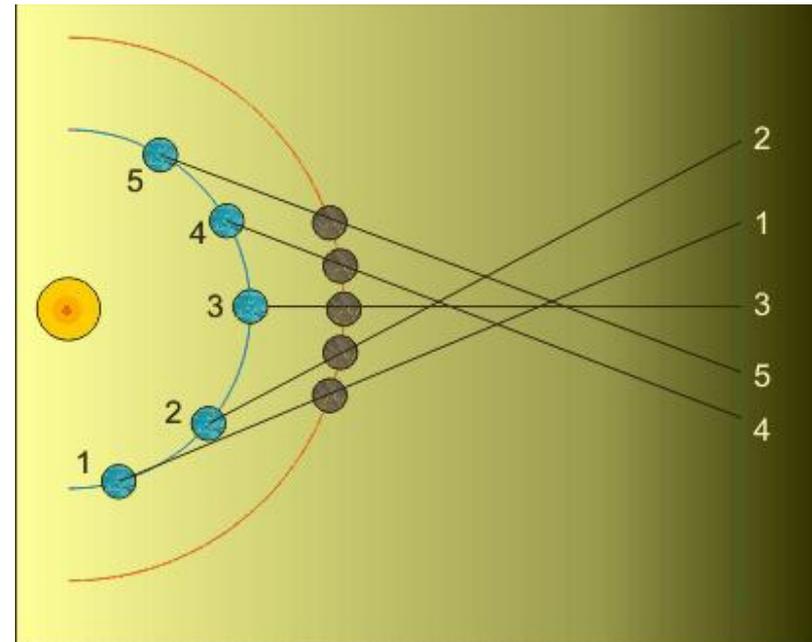
Rückläufige Bewegung des Mars



Erklärung der beobachteten Schleifenbewegung des Mars durch ein heliozentrisches Planetensystem



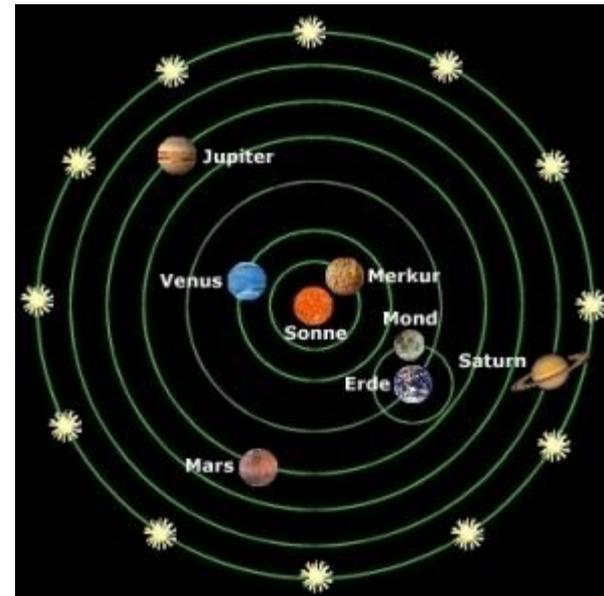
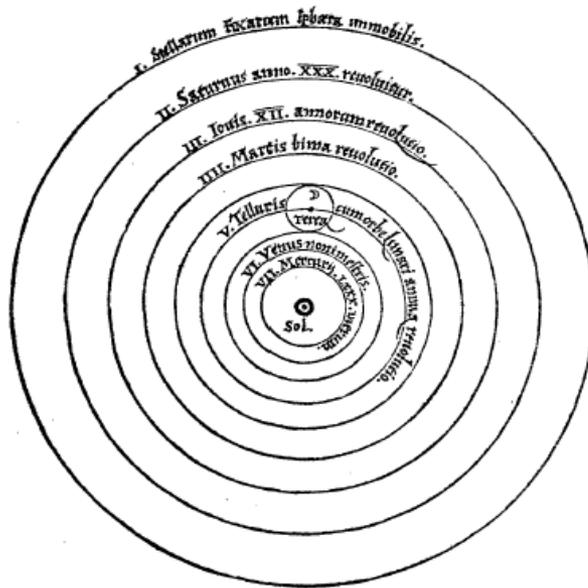
Beobachtete Schleifenbewegung



Erklärung: Die Erde läuft schneller und überholt den Mars



Das heliozentrische Planetensystem



Links eine Originalzeichnung aus Kopernikus' Werk, rechts eine klarere Version

Vorteile und offene Fragen beim heliozentrischen System

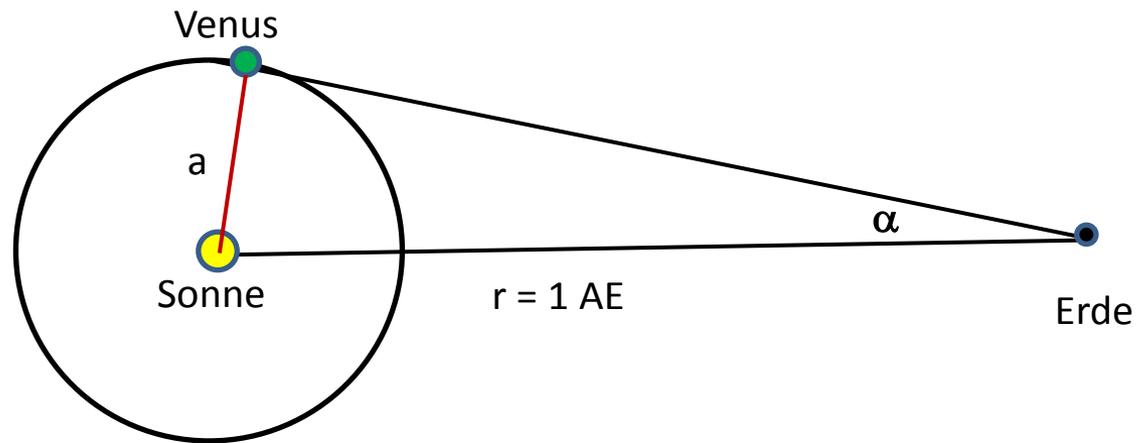
In diesem System ergeben sich zwangsläufige Erklärungen für:

- die Sonnennähe von Merkur und Venus
- die Helligkeitsunterschiede und die verschiedenen scheinbaren Geschwindigkeiten der Planeten während eines Umlaufs um die Sonne
- die zeitweise rückläufige Bewegung der Planeten

Offen bleiben die Fragen:

- Wie könnte man die tägliche Umdrehung der Erde nachweisen?
- Warum beobachtet man keine jährliche Parallaxe der Fixsterne?

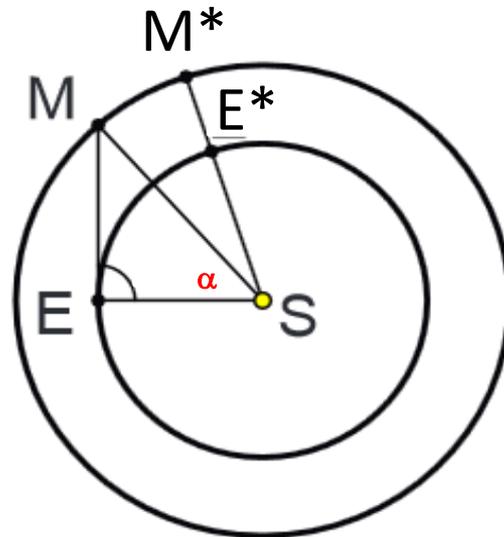
Bestimmung des Radius der Venusbahn in Erdbahnradien



$$a = r \cdot \sin \alpha ;$$

Mit $\alpha = 46^\circ$ folgt für den Abstand Sonne-Venus: $a = 0.7 \text{ AE}$

Bestimmung des Radius der Marsbahn in Erdbahnradien

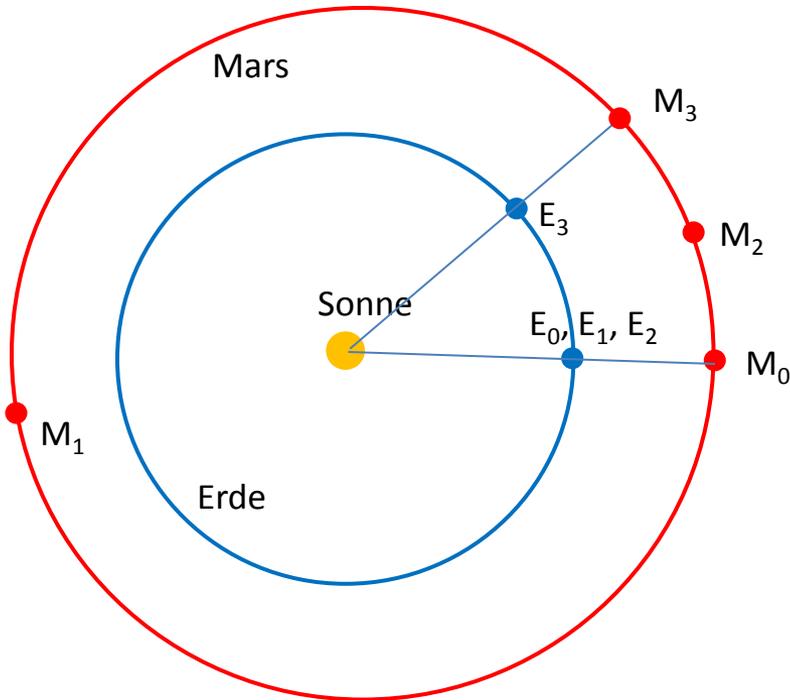


Bei bekanntem Winkel α erhält man den Bahnradius des Mars $r_M = SM = SE/\cos\alpha = 1 \text{ AE}/\cos\alpha$

Bestimmung von α : Ausgehend von der Oppositionsstellung SE^*M^* misst man die Zeit t bis zur Quadratur SEM , wenn von der Erde aus Sonne und Mars unter einem Winkel von 90° gesehen werden.

Für die Winkel gilt: $ESE^* = t/T_E$ und $MSM^* = t/T_M$; woraus $\alpha = ESE^* - MSM^*$ folgt.

Bestimmung von siderischen Umlaufdauern



Planet	Synodische Umlaufdauer S	Siderische Umlaufdauer T
Merkur	116 d	88 d
Venus	587 d	225 d
Erde		1,00 a
Mars	2,11 a	1,90 a
Jupiter	1,09 a	11,9 a
Saturn	1,04 a	29,5 a

Der sonnennähere Planet umläuft von einer Opposition bis zur nächsten einmal mehr um die Sonne als der sonnenfernere, d.h. für den überstrichenen Winkel bei den oberen Planeten gilt:

$$\varphi_E = \varphi_O + 2\pi, \rightarrow \omega_E S = \omega_O S + 2\pi, \rightarrow 2\pi/T_E S = 2\pi/T_O S + 2\pi \rightarrow$$

$$1/T_O = 1/T_E - 1/S$$

Entsprechend gilt für die unteren Planeten:

$$1/T_U = 1/T_E + 1/S$$

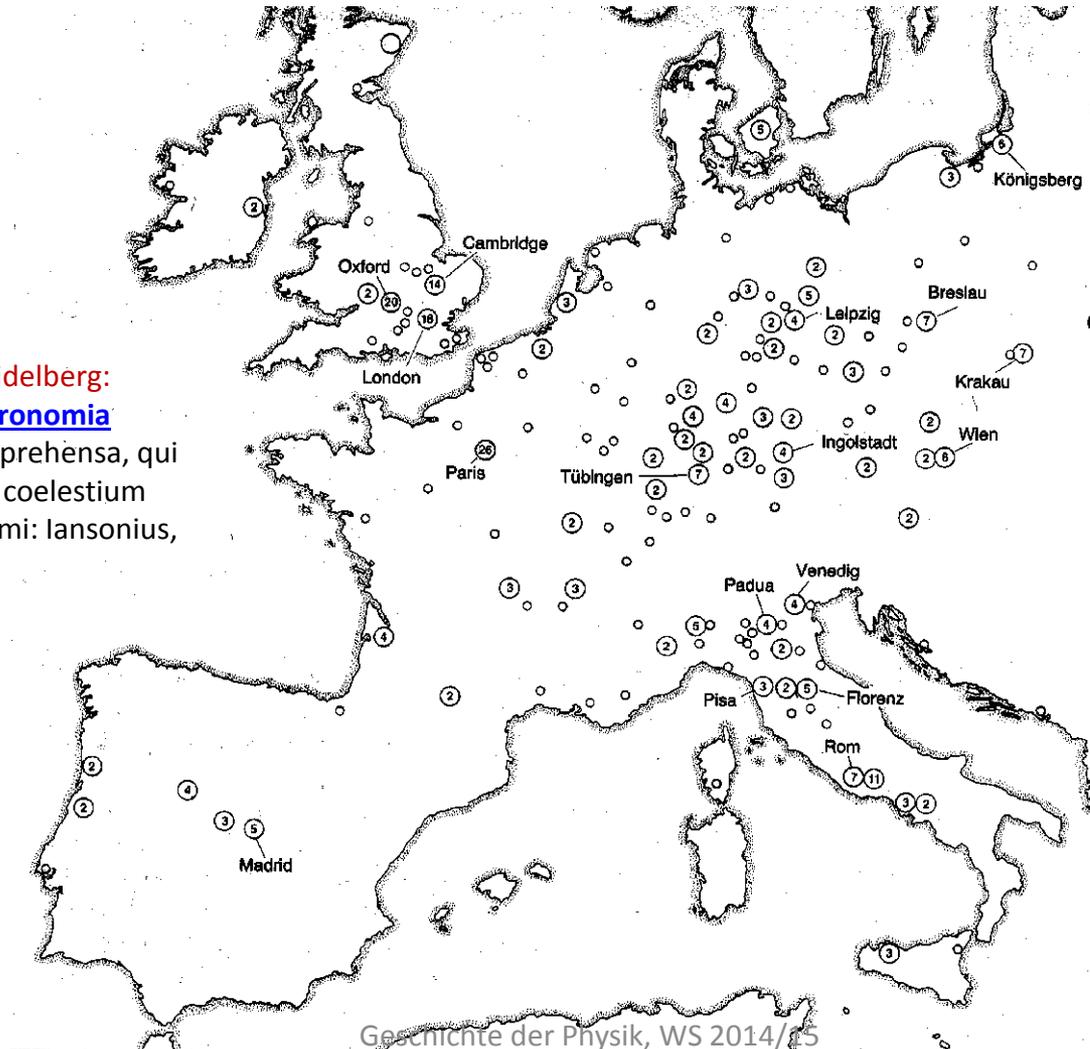
Aufnahme des kopernikanischen Weltbildes im 16. Jahrhundert

1. Unter den Wissenschaftlern: positiv,
aber: die die nach diesem Weltbild erstellten
„Prutenischen Tafeln“ waren nicht wesentlich genauer als
die „Alfonsinischen Tafeln“ aus dem 13. Jahrhundert.
2. Unter den Theologen: verschieden
Luther und Melancton machten sich lustig,
der Papst versuchte Kopernikus an der Kalenderreform zu
beteiligen.

Verbreitung der Exemplare von „De revolutionibus“ in Europa Anfang des 17. Jahrhunderts

Universitätsbibliothek Heidelberg:

Kopernikus, Nikolaus: [Astronomia
instaurata](#) : libris sex comprehensa, qui
de revolutionibus orbium coelestium
inscribuntur. -Amstelrodami: Iansonius,
1617. - 487 S.



1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

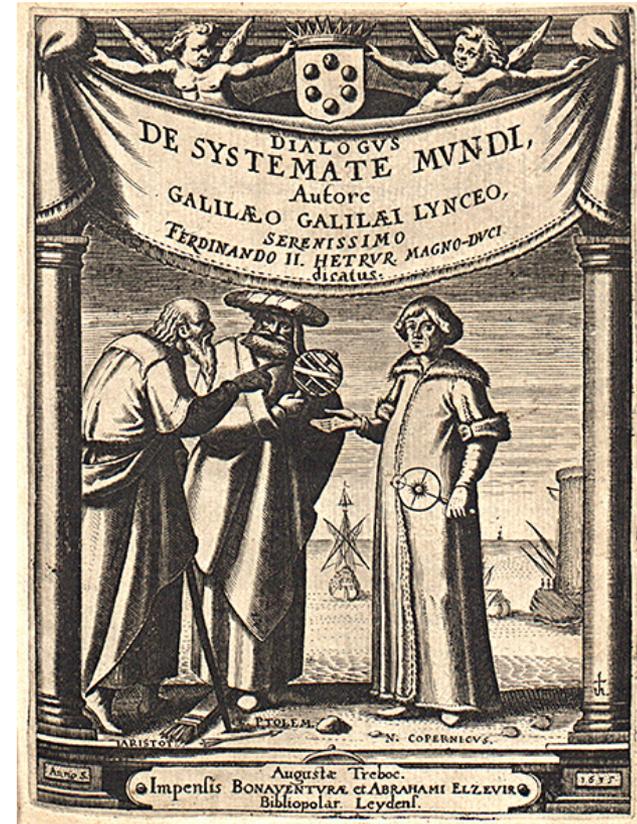
1.3 Ptolemäus

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

1.5 Die kopernikanische Revolution

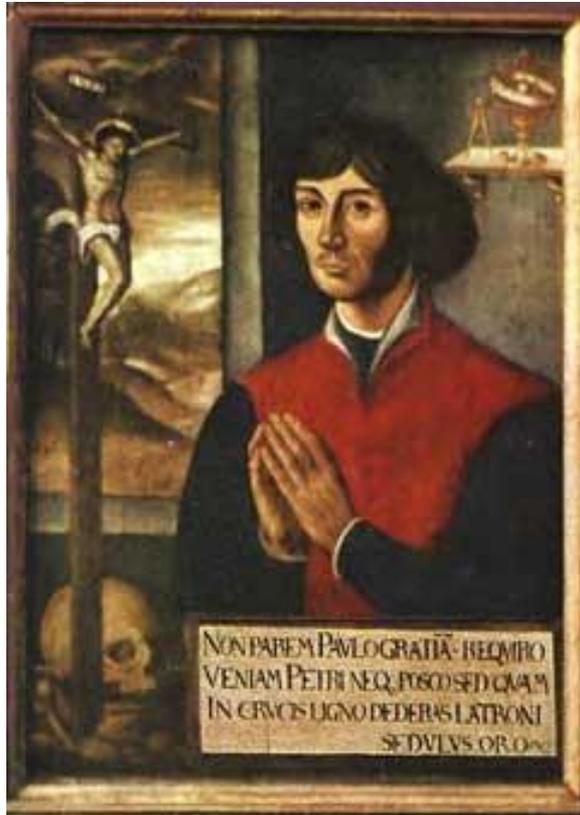
1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus
(Titelbild von Galileis „Dialog über die
Weltsysteme“, Florenz, 1631)

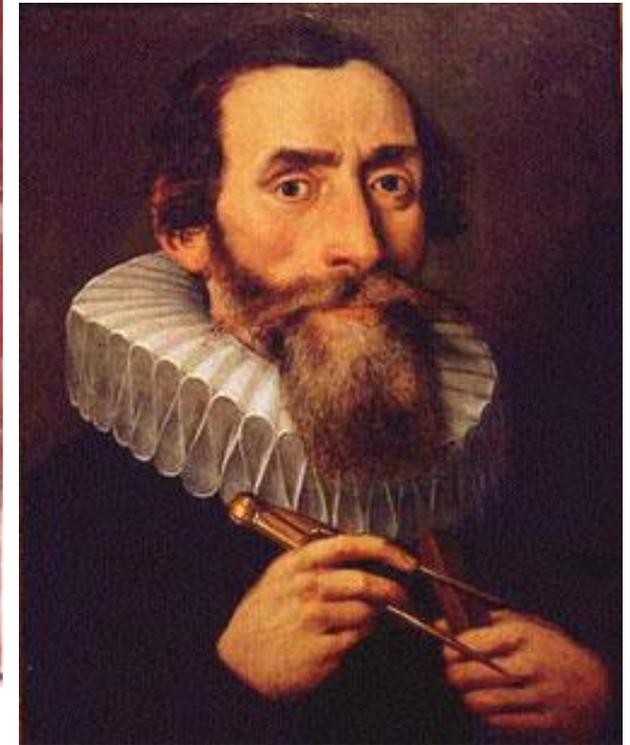
Kopernikus – Brahe - Kepler



Nikolaus Kopernikus
(1473 – 1543)

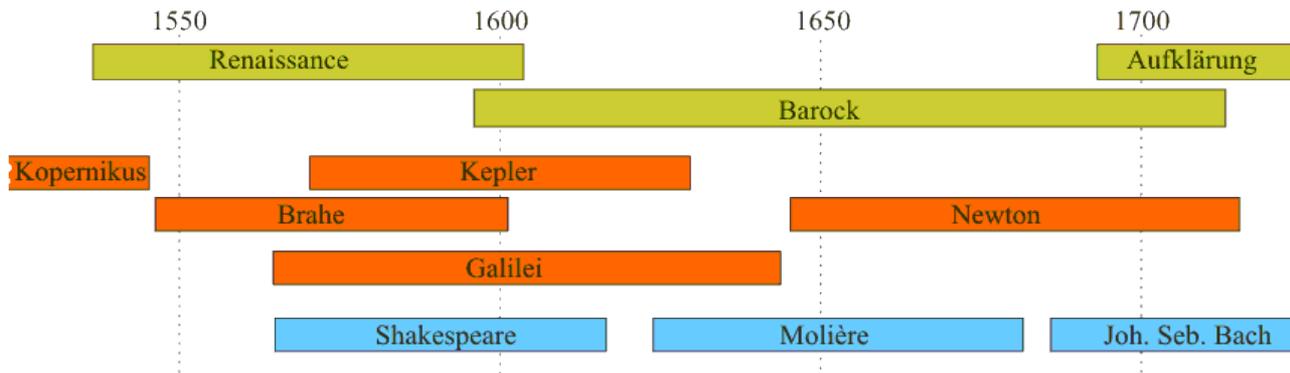


Tycho Brahe
(1546 – 1601)



Johannes Kepler
(1570 – 1630)

Zeitliche Einordnung



Geschichtlicher Hintergrund

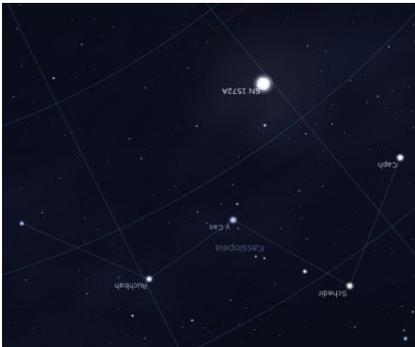
- Ab 1545: Zeitalter der Gegenreformation
- Vordringen der Türken auf dem Balkan
- 1618 – 1648: Dreißigjähriger Krieg



Wichtige astronomische Ereignisse in Brahes Leben

1. Eine partielle Sonnenfinsternis im Jahre 1559
2. Eine Konjunktion der Planeten Jupiter und Saturn im Jahre 1563
3. Im November 1572 erscheint im Sternbild Cassiopeia eine Nova,
4. 4 Jahre später erschien ein Komet,

Nova und Komet zerstörten das Bild vom unwandelbaren und perfekten Himmel mit seinen undurchdringbaren kristallinen Sphären.





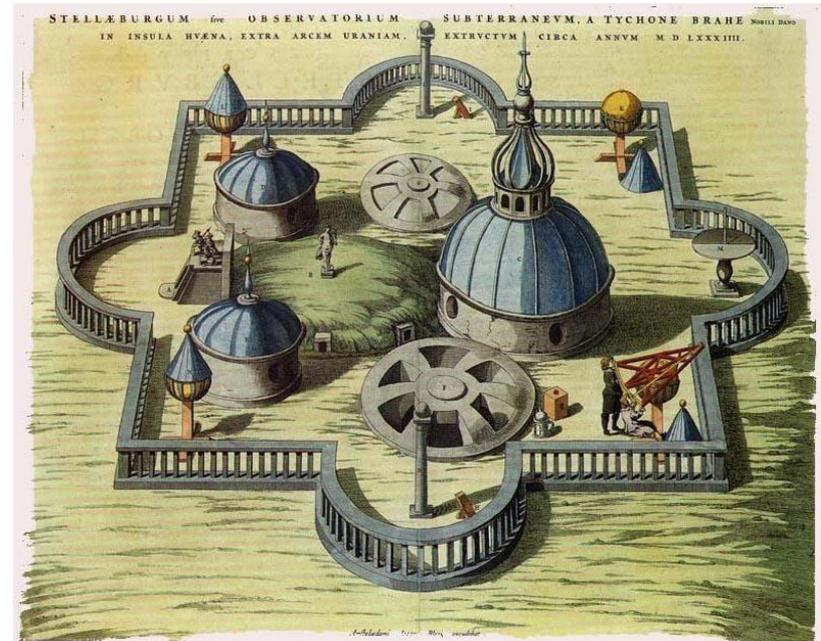
Lage der Insel Ven bzw. Hven,

Brahes Sternwarten auf der Insel Hven



Uraniborg main building. Copper etching from Blaeu's Atlas Major, 1663.

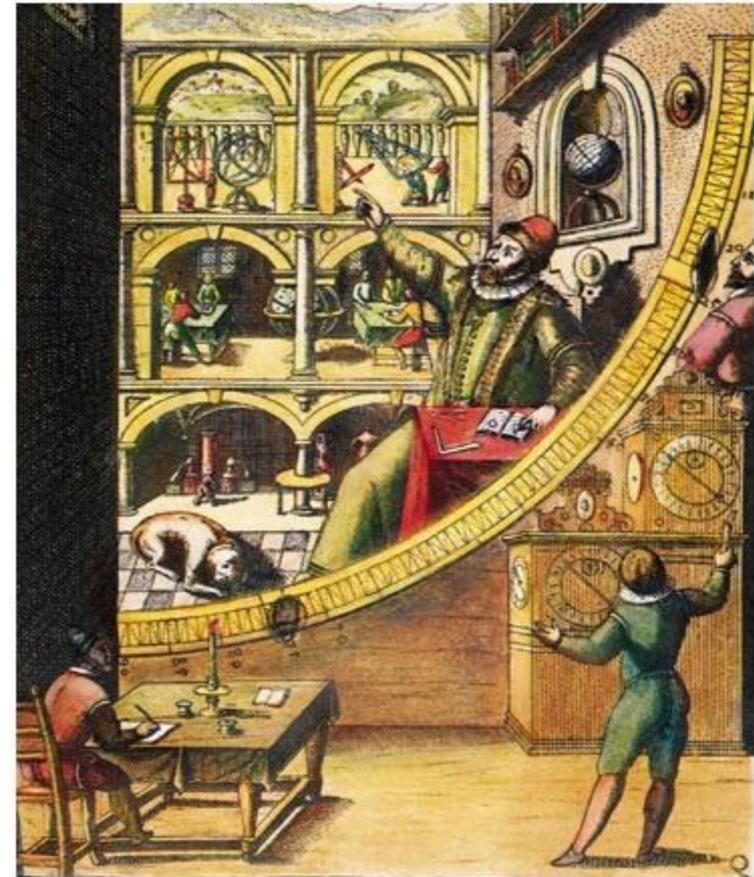
Uraniborg



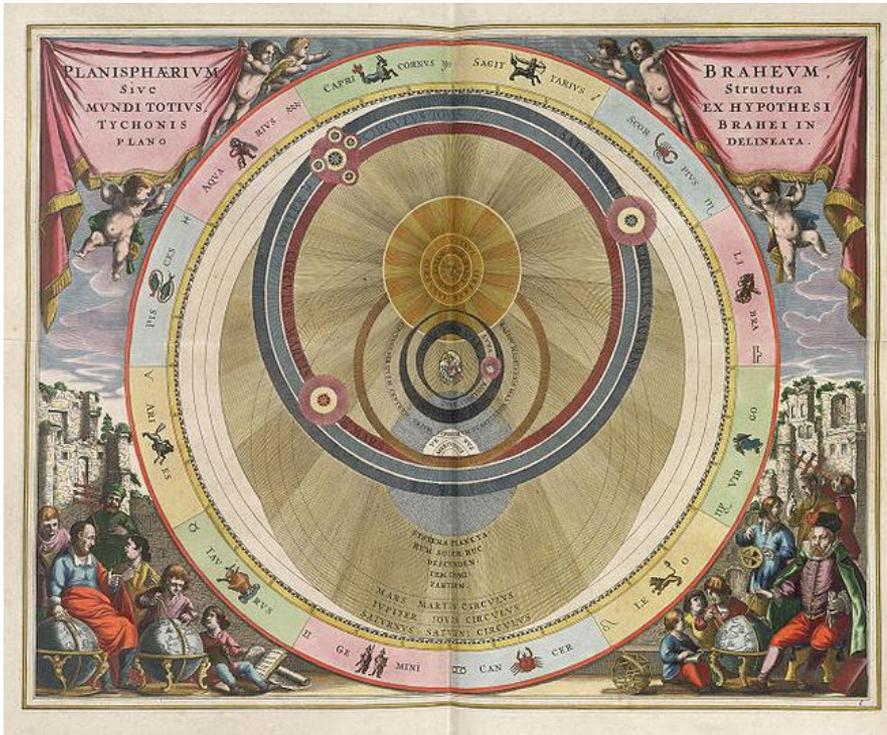
Geschichte der Physik, WS 2014/15

Stjerneborg

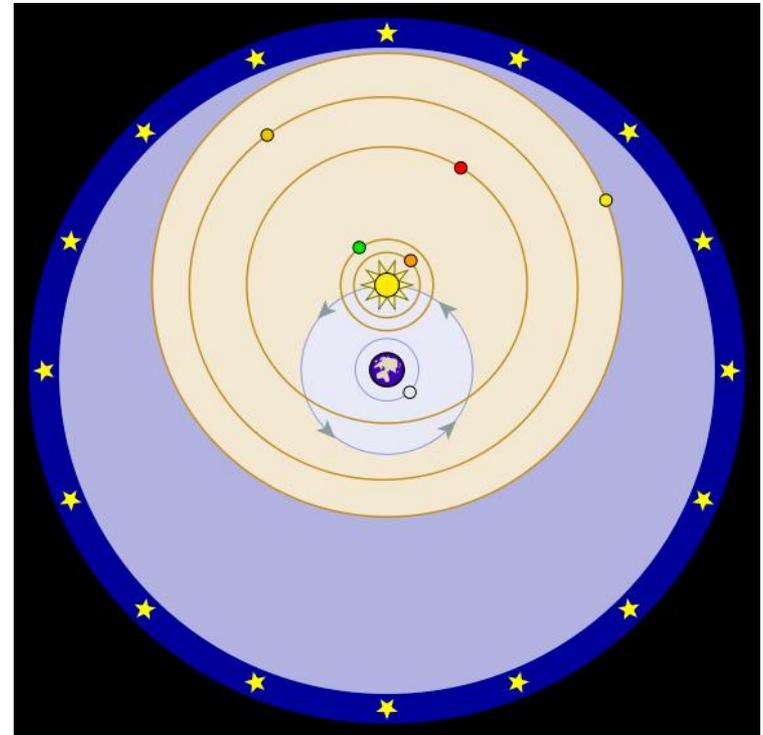
Brahes Mauerquadrant



Das Planetensystem von Tycho Brahe

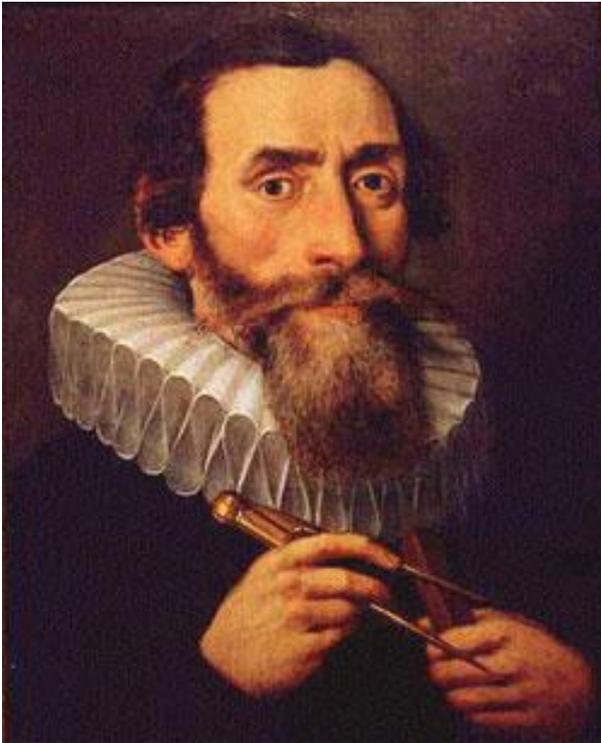


Künstlerische Darstellung



Prinzipielle Anordnung

Johannes Kepler (1570 – 1630)



Kepler im Jahre 1610

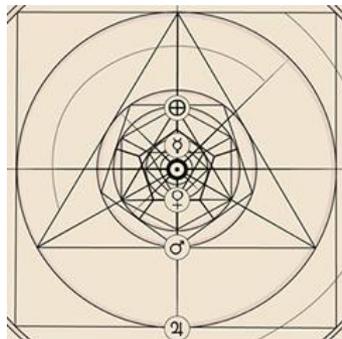
- 1570 Geboren in Weil der Stadt
- 1589 - 1593 Studium in Tübingen: Physik, Mathematik und Astronomie (bei M. Maestlin) und später auch Theologie
- 1594 Mathematiklehrer und Landachftsmathematiker in Graz
- Ab 1600 arbeitet Kepler in Prag an der Auswertung der Braheschen Beobachtungen.
- 1609 Veröffentlichung der beiden ersten Keplerschen Gesetze
- 1612 Kepler muss Prag aus religiösen Gründen verlassen, arbeitet zunächst in Linz, später in Sagan im Dienste Wallensteins.
- 1630 Tod in Regensburg



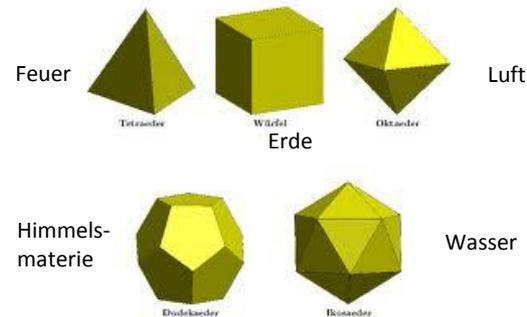
Modell aus dem Keplermuseum

Keplers Bauplan des Planetensystems mit Hilfe der 5 Platonischen Körper „Mysterium Cosmographicum“ (1595)

"Die Erdbahn ist das Maß für alle anderen Bahnen. Ihr umschreibe ein Dodekaeder, die diesen umspannende Sphäre ist der Mars. Der Marsbahn umschreibe ein Tetraeder, die dieses umspannende Sphäre ist der Jupiter. Der Jupiterbahn umschreibe man einen Würfel. Die diesen umspannende Sphäre ist der Saturn. Nun lege in die Erdbahn ein Ikosaeder; die diesem eingeschriebene Sphäre ist die Venus. In die Venusbahn lege ein Oktaeder, die diesem eingeschriebene Sphäre ist der Merkur."



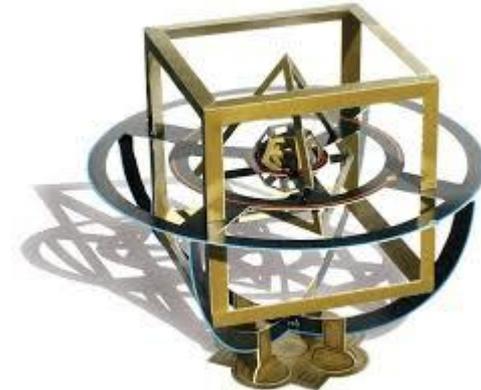
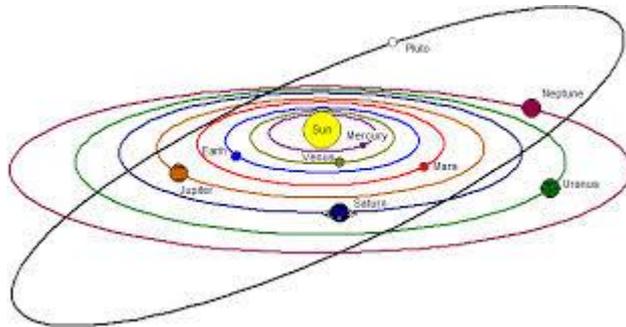
Zweidimensionale Darstellung



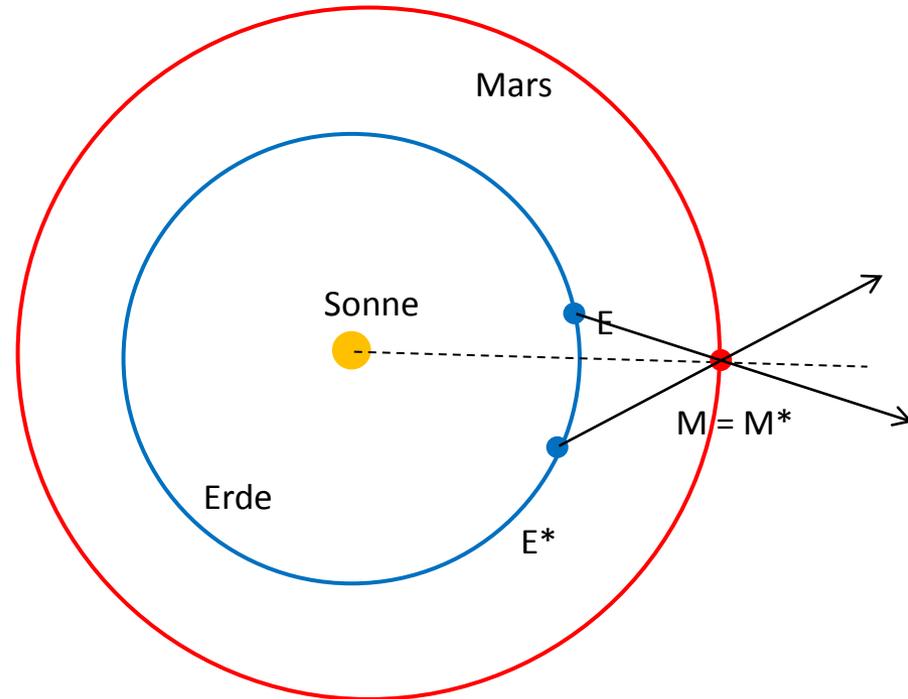
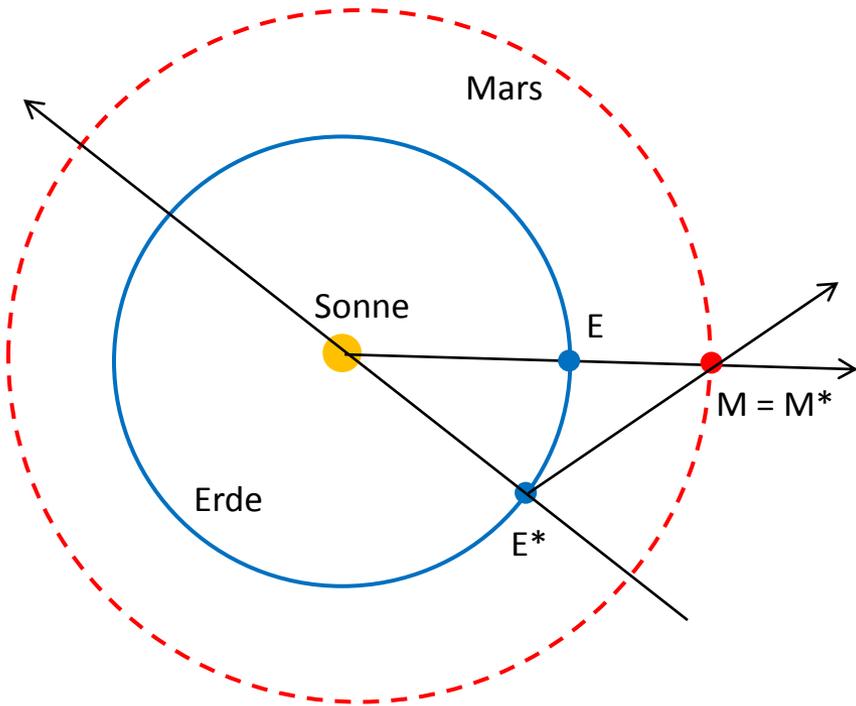
Mit Hilfe der 5 platonischen Körper leitete Kepler die Radien der 6 Planetenbahnen ab.

Planet	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn
heute	0.390	0.720	1	1.520	5.200	9.550
Kepler	0.429	0.762	1	1.440	5.261	9.163

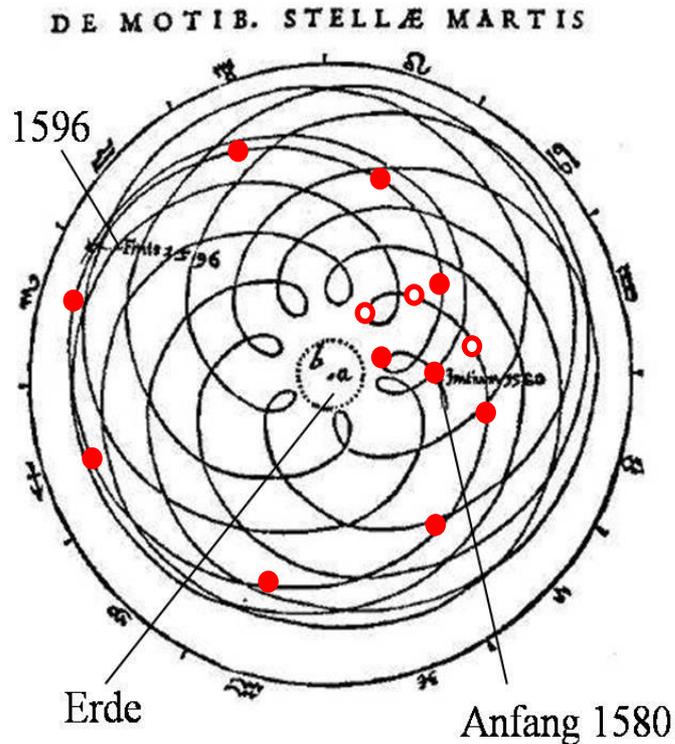
Radien der Planetenbahnen in astronomischen Einheiten (AE)



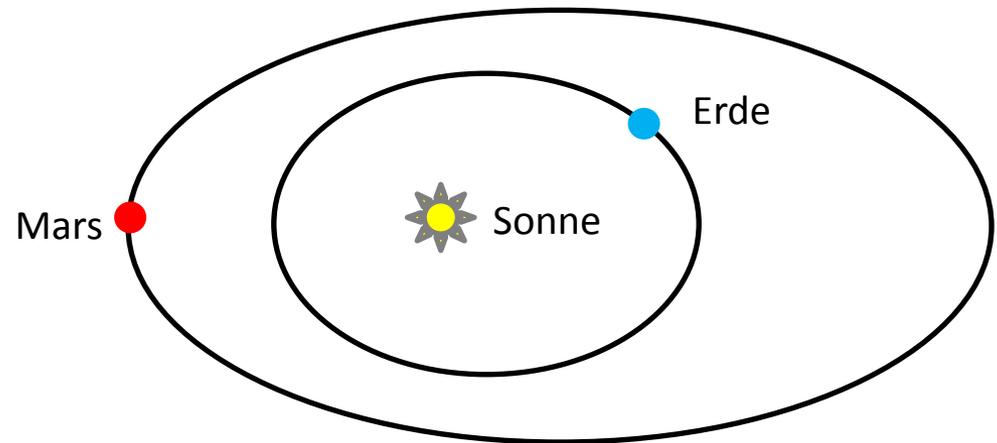
Keplers Überlegungen zum Auffinden der Erdbahn und der Marsbahn



Die Bewegung des Mars um die Erde und um die Sonne



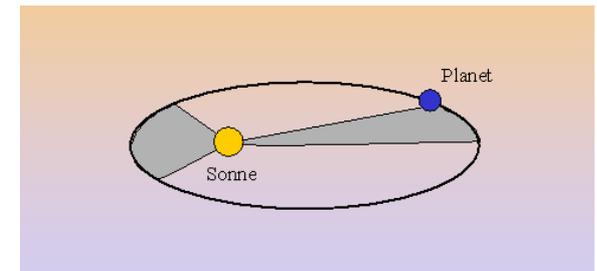
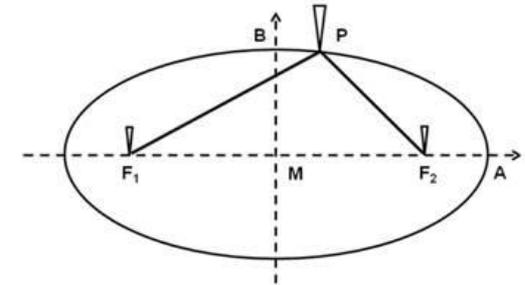
Die Bahn des Mars von der Erde aus
gesehen zwischen 1580 und 1596



Die Ellipsen der Erd- und Mars-
bahn im heliozentrischen System

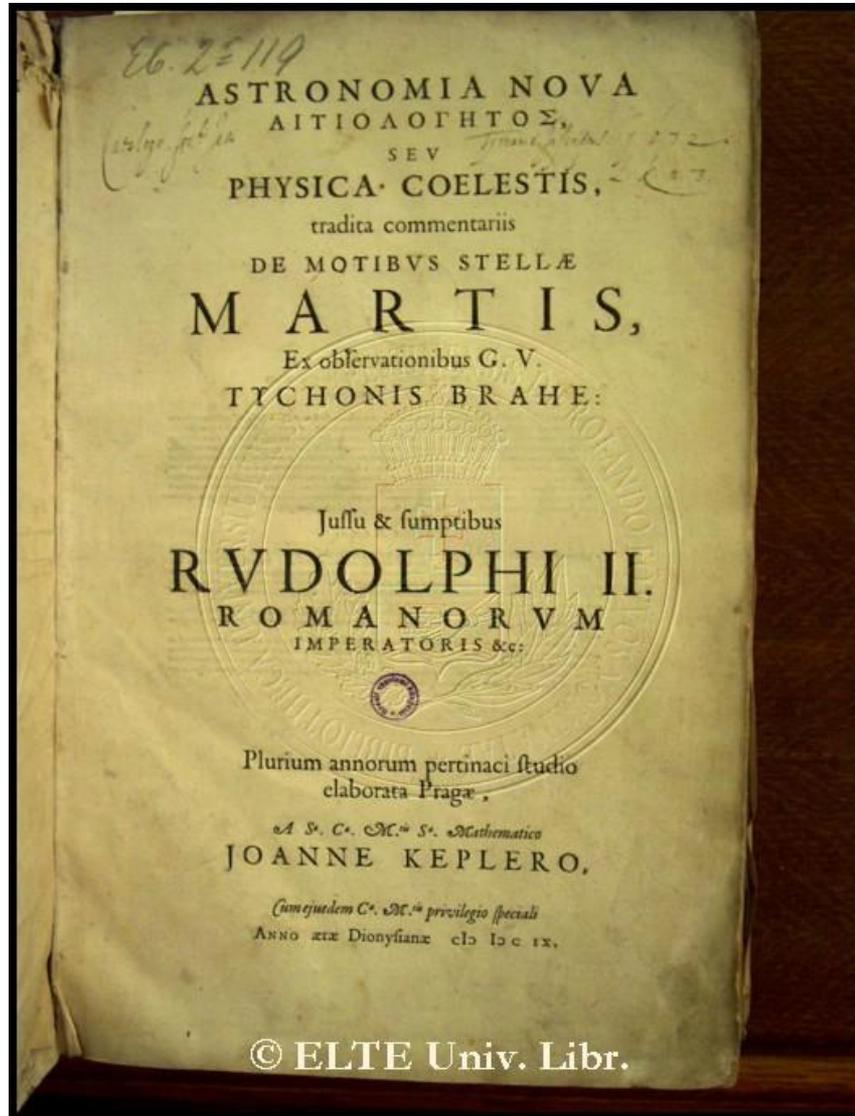
Die drei Keplerschen Gesetze

1. Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Ein von der Sonne zum Planeten gezogener "Fahrstrahl" überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen.
(Drehimpulserhaltung)
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen (Kuben) der großen Bahnhalbachsen.



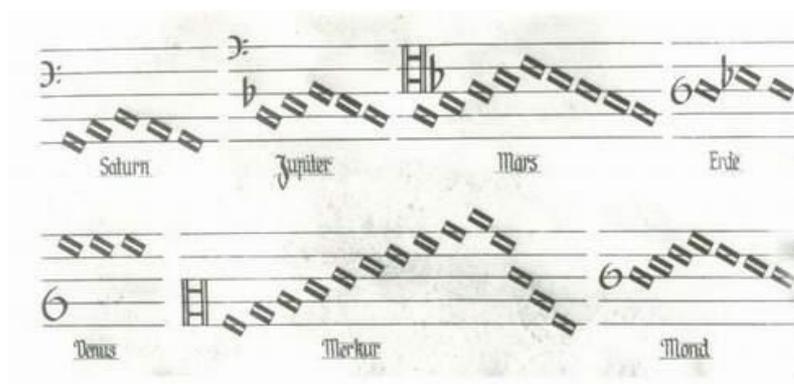
$$T^2 / a^3 = \text{const.}$$

Titelblatt der "Astronomia nova"
aus dem Jahre 1609



Harmonice Mundi - Keplers „Sphärenmusik“ (1619)

Die ersten beiden von fünf Büchern der "Weltharmonik" beschäftigten sich mit dem Begriff der Harmonie in der Mathematik, die letzten drei mit den Anwendungen dieses Begriffs auf die Musik, Astronomie und Astrologie. Zwischen den vielen üppigen Phantasien enthält Keplers 5. Buch der Harmonice Mundi auch sein drittes Gesetz der Planetenbewegung.



In den Harmonice mundi assoziierte Kepler musikalisches und astronomisches Geschehen: Jedem Planeten ordnete er ein Thema zu, dessen Töne seiner variierenden Geschwindigkeit entsprechen sollten. Damit suchte er auch die Exzentrizität der Bahnen zu demonstrieren.

1. Unser Planetensystem

1.1 Das geozentrische System der Pythagoreer

1.2 Entfernungsmessungen von Aristarch und Eratosthenes

1.3 Ptolemäus

1.4 Die Bewahrung des Wissens im Mittelalter

1.5 Die kopernikanische Revolution

1.6 Tycho Brahe und Johannes Kepler

1.7 Galileo Galilei, Himmelsbeobachtungen und Prozess

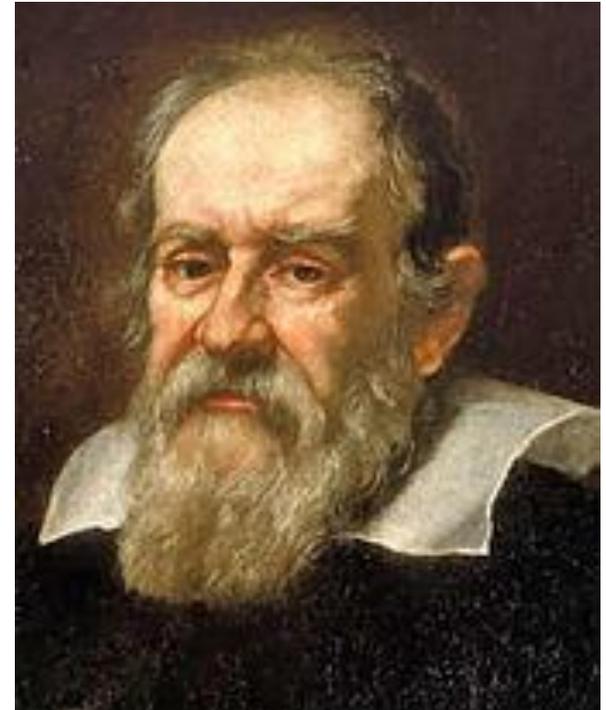
Galileo Galilei (1564 – 1642)

Bedeutende Zeitgenossen:

William Shakespeare 1564 – 1616

Rembrandt van Rijn 1606 - 1669

- 1564 geb. in Pisa in eine verarmte Patrizierfamilie
Studium der Medizin, dann Mathematik
- 1589 Lektor für Mathematik Univ. Pisa
- 1592 Lehrstuhl für Mathematik Univ. Padua
Studien zur Mechanik, u.a. zum freien Fall
- 1609 Himmelsbeobachtungen mit dem Teleskop
- 1610 Hofmathematiker in Florenz
- 1616 Erste Ermahnung durch Bellarmin,
- 1616 Kopernikus' Werk wurde nicht verboten, sondern nur
„suspendiert“
- 1632 Der „Dialog“ erscheint und wird kurz darauf verboten
- 1633 Prozess, Urteil „Hausarrest“, dort Arbeit an den „Discorsi“
- 1642 gest. im Hausarrest in Arcetri bei Florenz



Porträt aus dem Jahre 1636

Galileo Galilei

Das Galileische Fernrohr

Im Jahre 1608 wird das Fernrohr in der Werkstatt des holländischen Brillenmachers Hans Lipperhey entdeckt und von Galilei weiterentwickelt.



Daten zu Galileis Fernrohren:

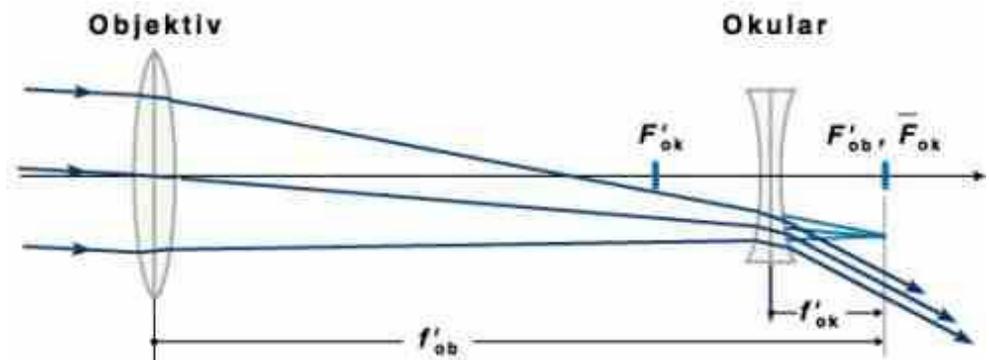
Länge: ca. 1,5 m

Durchmesser der Objektivlinse: 5 – 10 cm

Durchmesser der Eintrittsblende: 1,5 – 2,5 cm

Vergrößerung: 10 – 20 fach

Steigerung der Helligkeit: 10 – 20 fach



Strahlengang

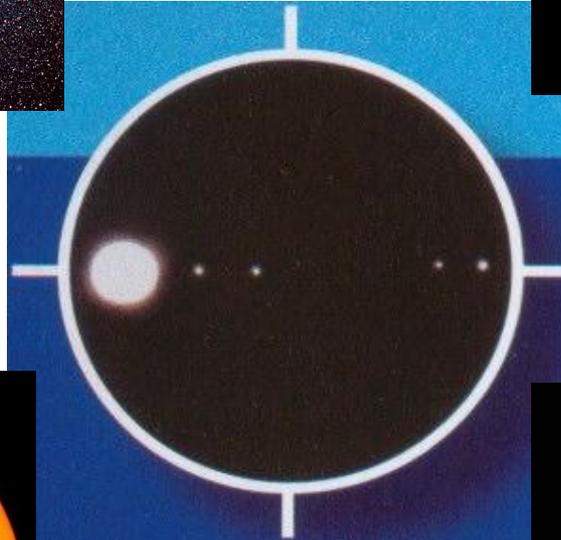
Galileis Himmelsbeobachtungen



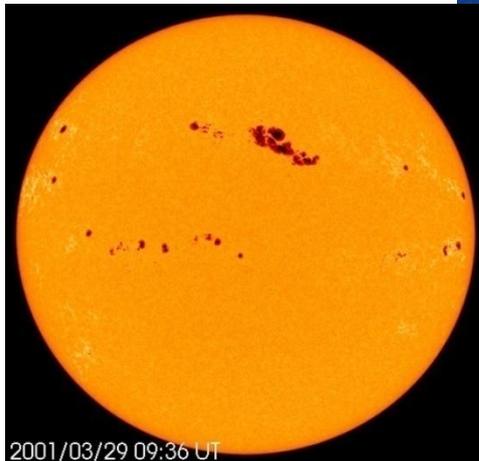
Milchstraße



Mondoberfläche



Jupitermonde



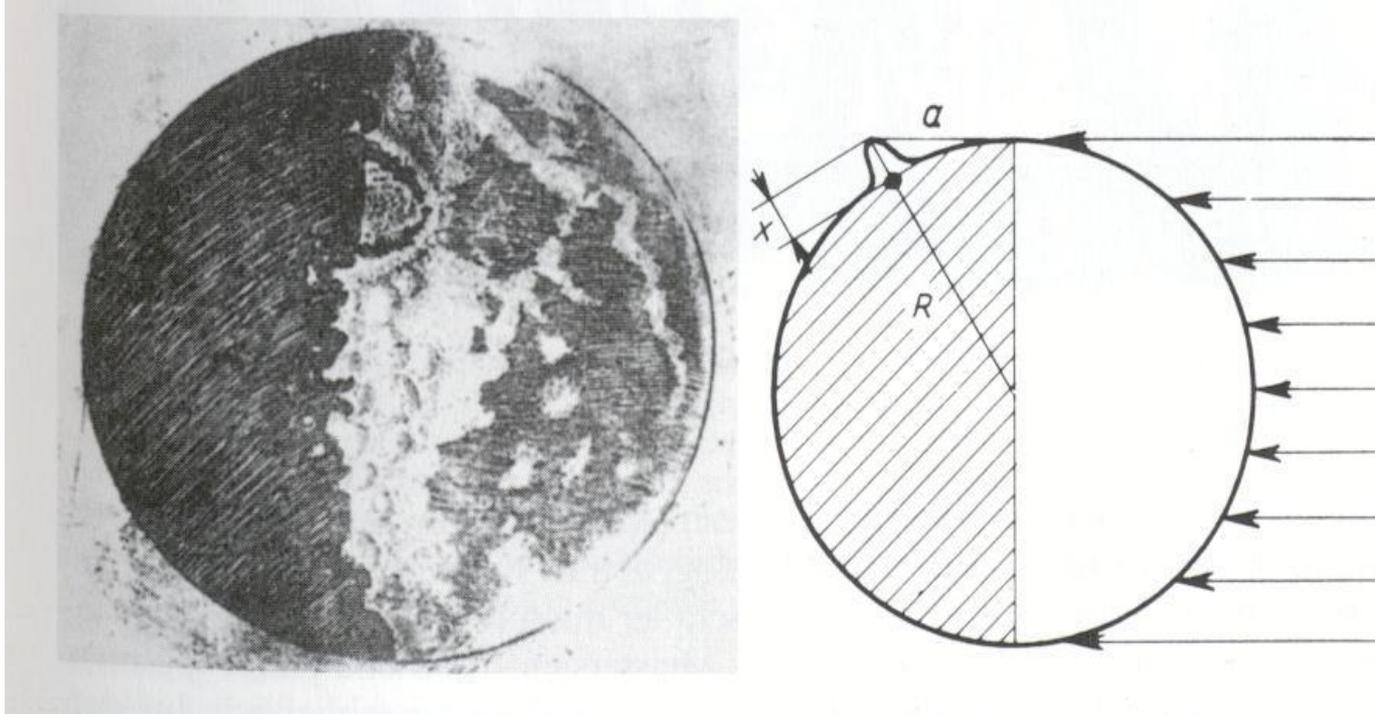
Sonnenflecken



Venusphasen

Die Ansicht der Mondoberfläche

(aus Galileis Dialogo)



Die „Narben“ sind ein Hinweis auf die „Unvollkommenheit“ der Himmelskörper und widersprechen den Vorstellungen über die Vollkommenheit der supralunaren Sphäre. Aus der Größe der Schatten lässt sich die Höhe (bis zu 10 km) der Mondberge berechnen.

Beobachtung der Jupitermonde

Galileis erste Beobachtungen



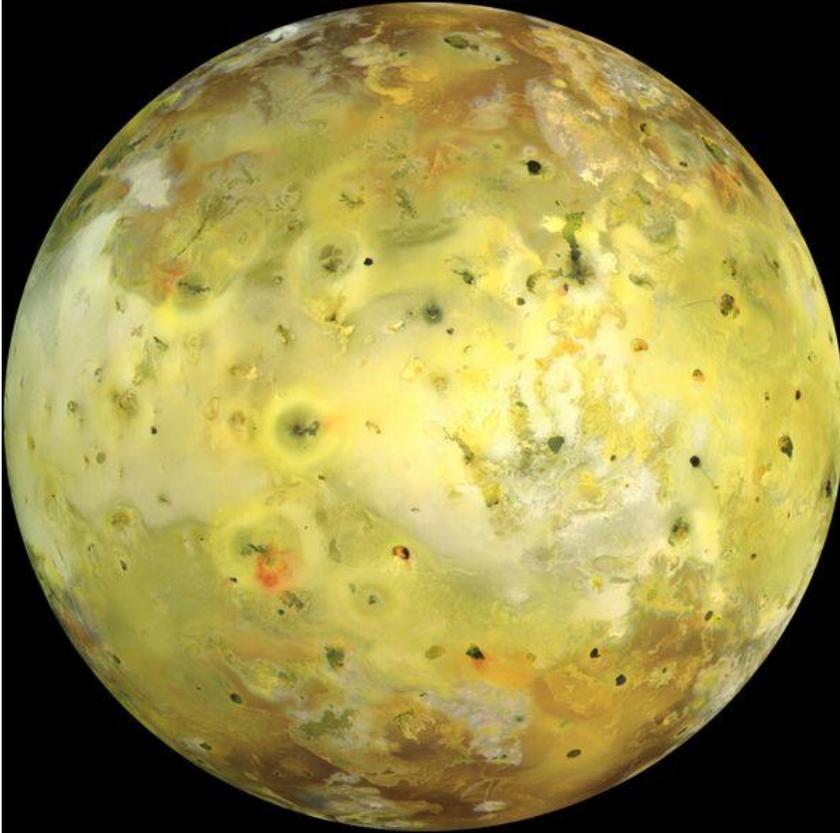
Foto aus neuerer Zeit



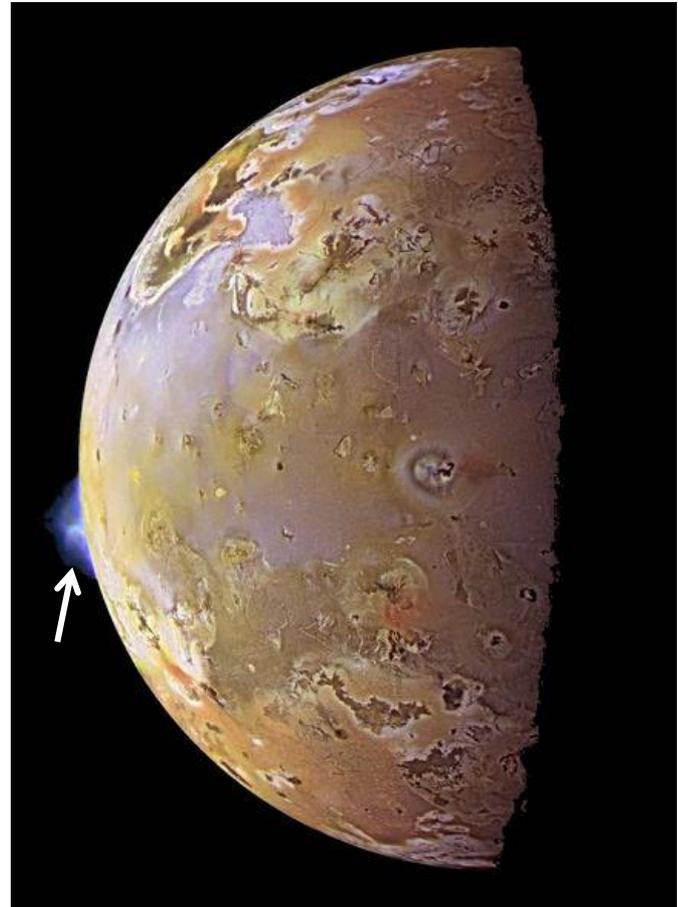
Name	Durchmesser	Bahnradius	Umlaufzeit
Io	3630 km, 1.2"	421 000 km	1.769 Tage
Europa	3138 km, 1.1"	672 000 km	3.551 Tage
Ganimesdes	5262 km, 1.8"	1 072 000 km	7.155 Tage
Kallisto	4800 km, 1.6"	1 888 000 km	16.689 Tage

Die Existenz von Monden um den Planeten Jupiter unterstützt die Vorstellung, dass auch die Erde ein Planet mit einem Mond sein könnte.

Moderne Aufnahmen des Jupitermonds Io

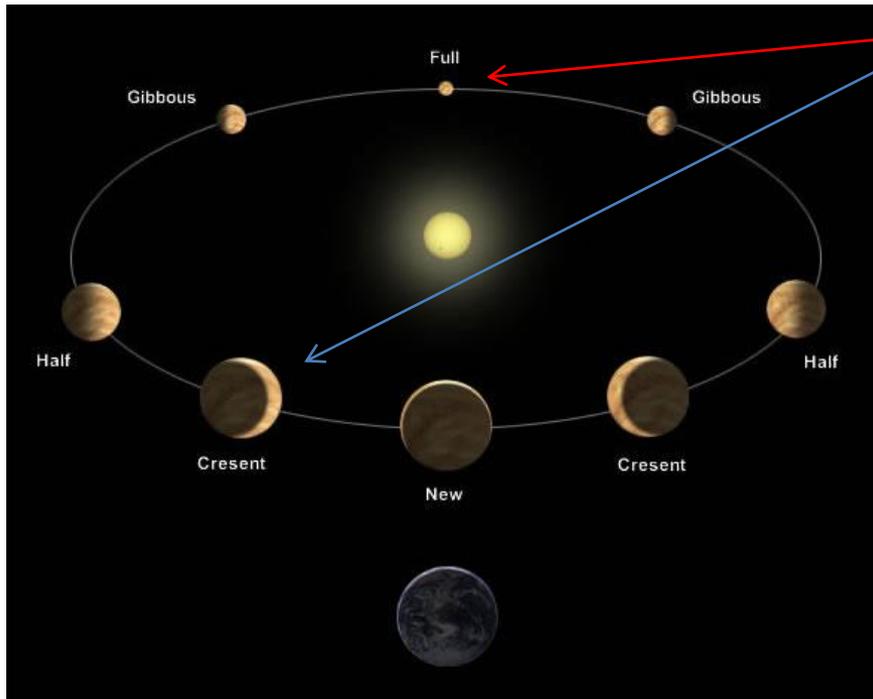


Jupitermond Io, aufgenommen aus einer Entfernung von 130.000 km von der Raumsonde Galileo am 3. Juli 1999



Die links am Horizont sichtbare vulkanische Eruption hat eine Höhe von 140 km.

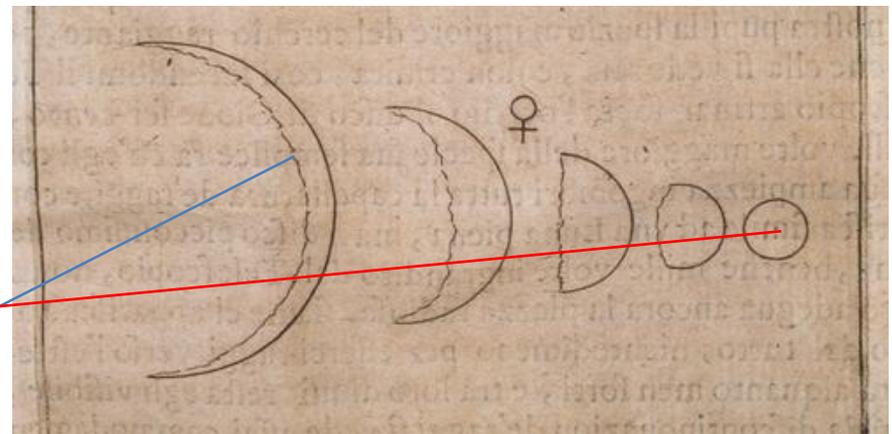
Die Phasen der Venus



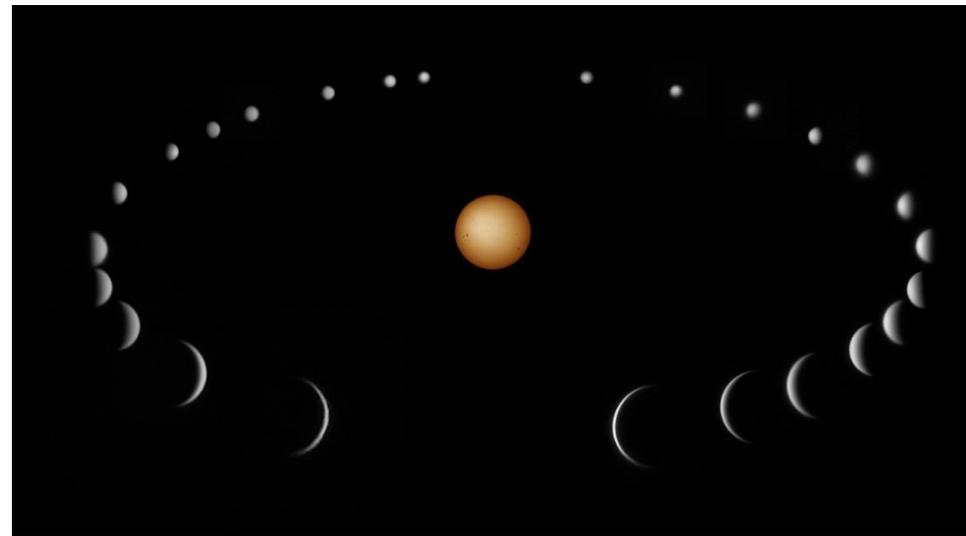
Schematische Darstellung

Durchmesser in größter Entfernung von der Erde: 10''
Durchmesser in kleinster Entfernung von der Erde: 50''
Siderische Umlaufdauer $T = 225$ d

Die beobachteten Phasen der Venus sind ein Beweis dafür, dass sich die Venus nicht um die Erde sondern um die Sonne bewegt.



Galileis Zeichnung über seine Beobachtungen



Fotografien

Dave Smith took this wonderful compilation showing all of Venus's phases between July 2010 and January 2012.

Der Sternenbote

1608 Erfindung des Fernrohrs in Holland

21 August 1609 Galilei demonstriert den Ratsherren von Venedig sein Fernrohr

15 Januar 1610: Galilei ist sich sicher, dass er die Jupitermonde entdeckt hat.

13 März 1610: Erscheinen des „Sternenboten“ (Sidereus Nuncius)



Galileis Auseinandersetzung mit der Kirche

- 1597** Galilei wird „heimlicher Kopernikaner“
- 1610** nach den Entdeckungen mit dem Fernrohr ist sich Galilei sicher, dass das Ptolemäische System falsch ist und versucht u.a. die Geistlichkeit davon zu überzeugen
- 1616** Das Werk von Kopernikus wird suspendiert (nicht auf den Index gesetzt!). Galilei wird von Kardinal Bellarmin ermahnt die Lehre des Kopernikus nicht mehr zu vertreten und zu verteidigen.
- 1623** Barberini, der an Astronomie interessiert ist und Galilei gewogen ist, wird der Papst Urban VIII. Galilei wittert „Morgenluft“ und beginnt den „Dialog“ zu schreiben.
- 1632** Die kirchliche Druckerlaubnis wird in Florenz erteilt, nachdem ein neues Vorwort und ein neuer Schluss hinzugefügt worden sind. Das Buch erscheint
- 1932** Das Imprimatur wird von Rom zurückgenommen und Galilei wird nach Rom zitiert.
- 1633** Prozess vor dem Inquisitionsgericht. Anklage wegen Ungehorsam. Galilei widerruft und wird zu lebenslangem Hausarrest verurteilt. Seine Bücher kommen auf den Index.
- 1642** Galilei stirbt
- 1758** Bücher, die das heliozentrische System vertreten, werden aus dem Index genommen.
- 1992** Galileo wird von Papst Johannes Paul II rehabilitiert.

Dialog über die Weltsysteme



Aristoteles, Ptolemäus und Kopernikus (v.l. n.r.)

DIALOGO DI GALILEO GALILEI LINCEO MATEMATICO SOPRAORDINARIO DELLO STUDIO DI PISA. *E Filosofo, e Matematico primario del* SERENISSIMO GR. DVCA DI TOSCANA.

Due ne i congressi di quattro giornate si discorre
fopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

CON PRI



VILEGI.

IN FIRENZA, Per Gio:Batista Landini MDCXXXII.

CON LICENZA DE' SUPERIORI.

Erstdruck: 1632 in Florenz,
Nach dem Verbot: Neudruck 1635
in Leiden

Galileis Relativitätsprinzip

Nach **Ptolemäus** kann es keine Eigendrehung der Erde geben, weil keine Veränderungen in der Bewegung von Körpern beobachtet werden.

Nach **Galilei** ist die Bewegung von Körpern unabhängig davon, ob sie in einem ruhenden oder gleichförmig bewegten System stattfindet.

Coriolis (1792 – 1843): Kraft $\mathbf{F}_C = 2 \cdot m \cdot \mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$; Auf der Erde: $F_C/mg \sim 10^{-5}$ für $v = 1\text{m/s}$

Historische Bedeutung des Prozesses

Galilei: Märtyrer oder Versager?

Für die römisch-katholische Kirche: Ein Pyrrhus Sieg.

Im Mittelalter galt: Die Wissenschaft ist die Magd der Theologie.

Seit dem Prozess gegen Galilei: die röm.-katholische Kirche (und andere Kirchen) können den wissenschaftlichen Fortschritt nur noch verdammen, aber nicht mehr kontrollieren.

Galileis Rehabilitation (1992) und das neue Verhältnis zwischen Wissenschaft und Glauben: Offenbarung und der Vernunftkenntnis sind gleichberechtigte Methoden, die für unterschiedliche Bereiche menschlicher Erkenntnis zuständig sind.