

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk

2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe

2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung

2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler

2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop

2.6 Biographie: Galilei

2.7 Der Prozess

2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung

2.9 Biographie: Newton

2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk

2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe

2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung

2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler

2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop

2.6 Biographie: Galilei

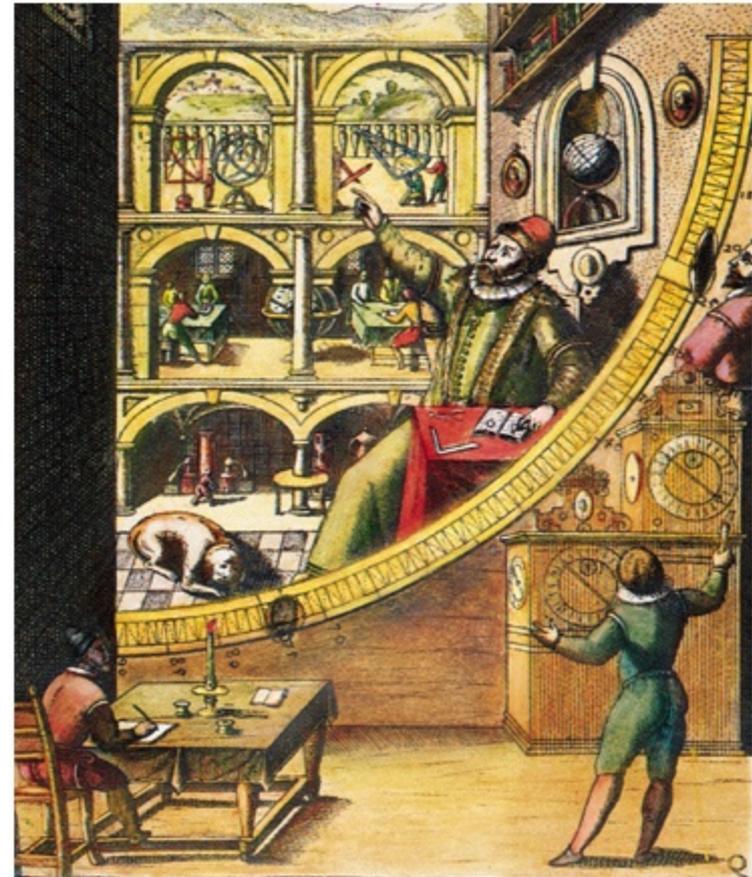
2.7 Der Prozess

2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung

2.9 Biographie: Newton

2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Brahes Mauerquadrant



Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk

2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe

2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung

2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler

2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop

2.6 Der Prozess

2.7 Biographie: Galilei

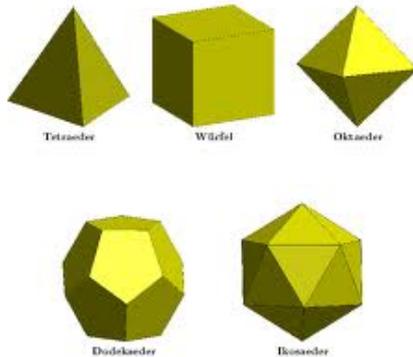
2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung

2.9 Biographie: Newton

2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

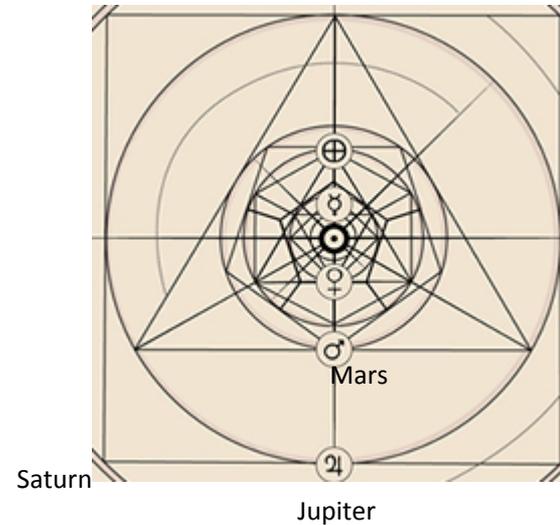


Modell aus dem Keplermuseum



Die 5 platonischen Körper
Daher nur 6 Planeten

Keplers Bauplan des Planetensystems aus den 5 Platonischen Körpern „Mysterium Cosmographicum“ (1595)



Zweidimensionale Darstellung

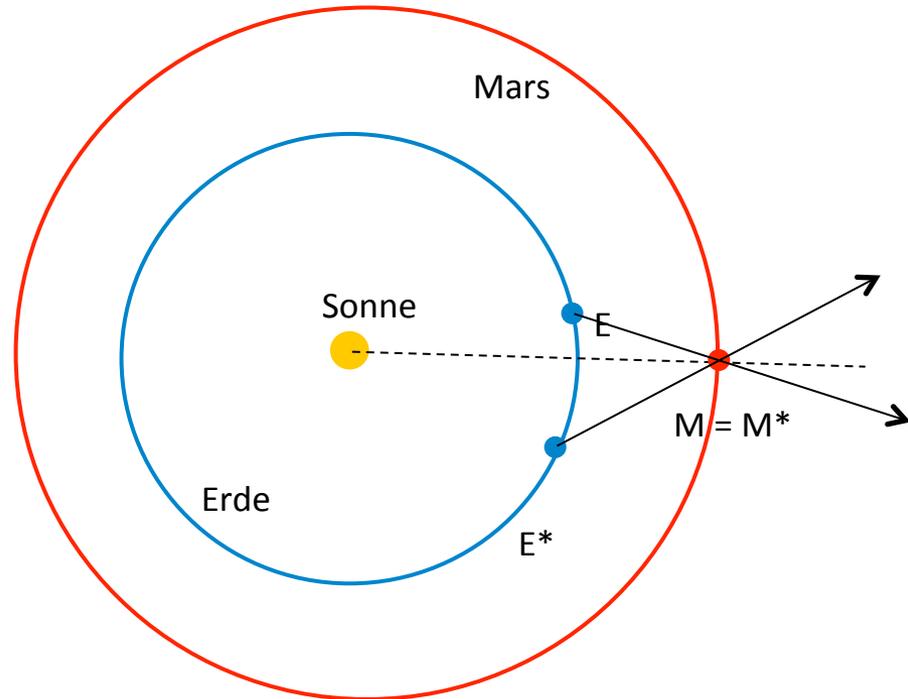
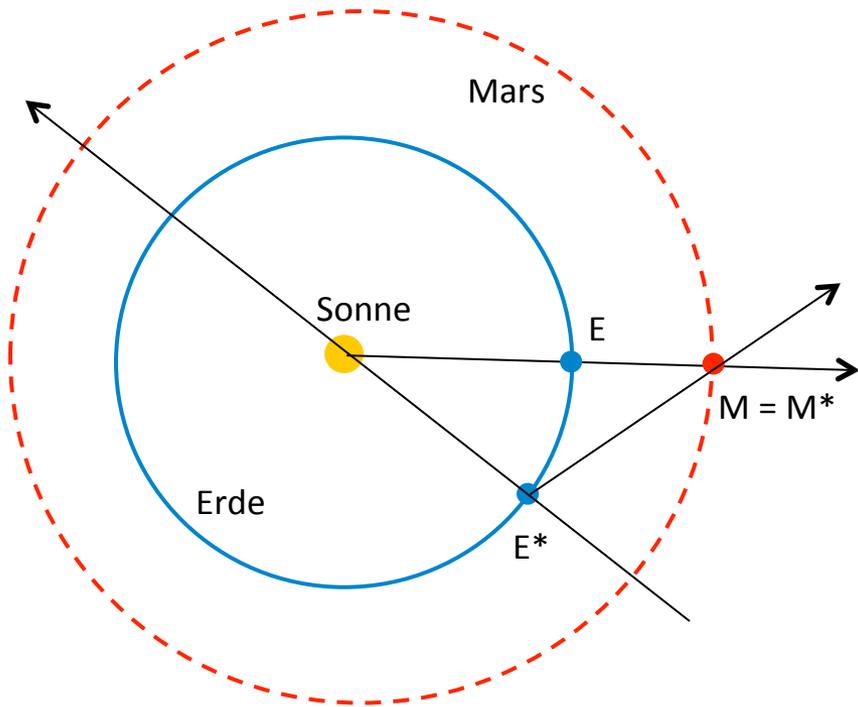
Titius-Bode-Regel

Ursprüngliche Formel: $R_n = 4 + 3 \times 2^n$

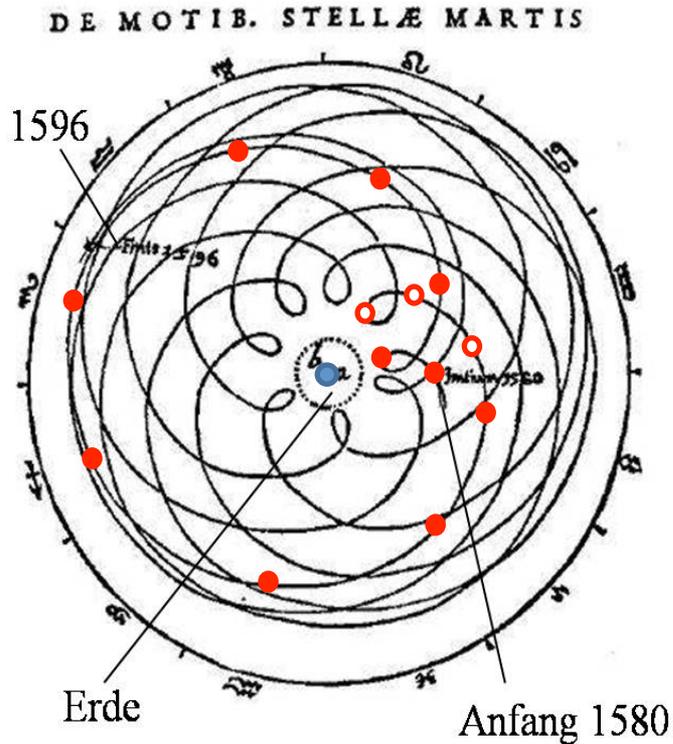
Der Exponent n steht, beginnend bei Merkur, für die Folge der Werte $-\infty, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ usw.. So ergibt sich von Merkur bis Saturn die Zahlenfolge 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100 ...

Planet	n	Nach Kepler	Abstand nach T-B	Wirklicher Abstand
Merkur	$-\infty$	0,429	0,4	0,39
Venus	0	0,726	0,7	0,72
Erde	1	1,000	1,0	1,00
Mars	2	1,440	1,6	1,52
(Ceres)	3		2,8	(2,77)
Jupiter	4	5,261	5,2	5,20
Saturn	5	9,163	10,0	9,54
Uranus	6		19,6	19,19
Neptun		–	–	30,06
(Pluto)	7		38,8	(39,48)
(Eris)	8		77,2	(67,7)

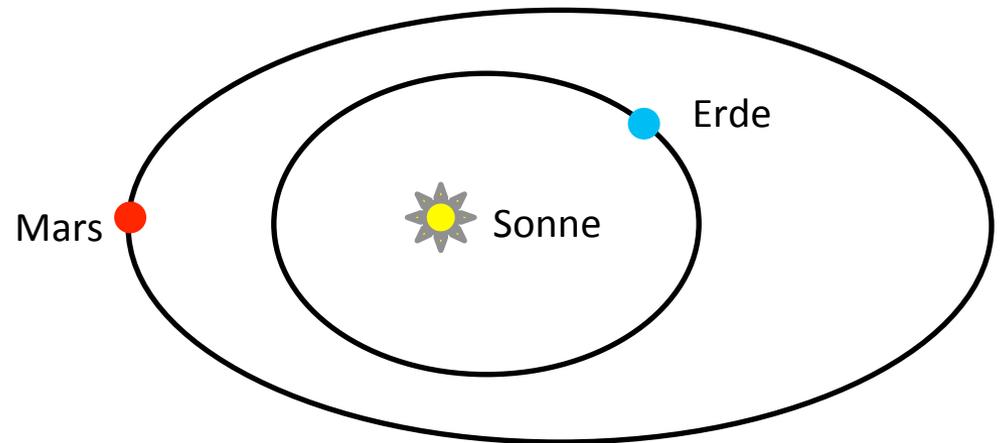
Keplers Überlegungen zum Auffinden der Erdbahn und der Marsbahn



Die Bewegung des Mars um die Erde und um die Sonne



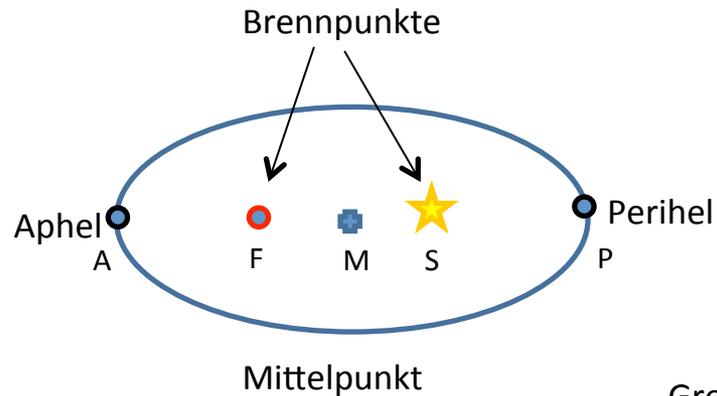
Die Bahn des Mars von der Erde aus
gesehen zwischen 1580 und 1596



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

Einige Daten über die Erde und den Mars

Planet	Sid. Umlaufszeit	Große Halbachse	Numerische Exzentrizität	Masse
Erde	1a	1 AE	0.017	1. M_E
Mars	1.881a	1.524 AE	0.093	0.11 M_E



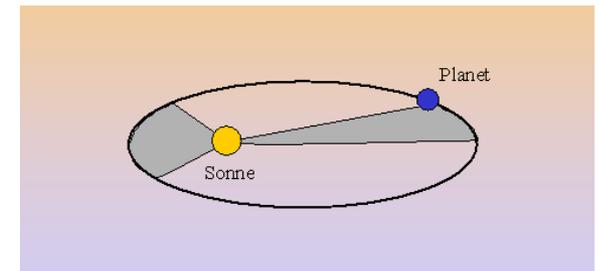
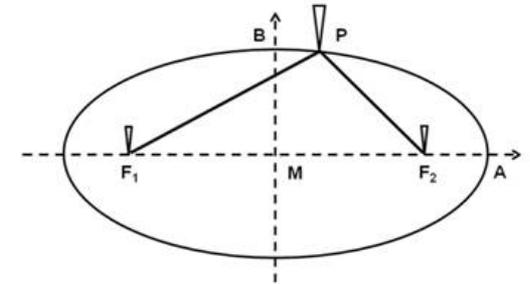
Große Halbachse: $a = MP = MA$

Numerische Exzentrizität ε :

$SP = a \cdot (1 - \varepsilon)$, $SA = a \cdot (1 + \varepsilon)$, $SF = 2 \cdot a \cdot \varepsilon$

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.



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

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

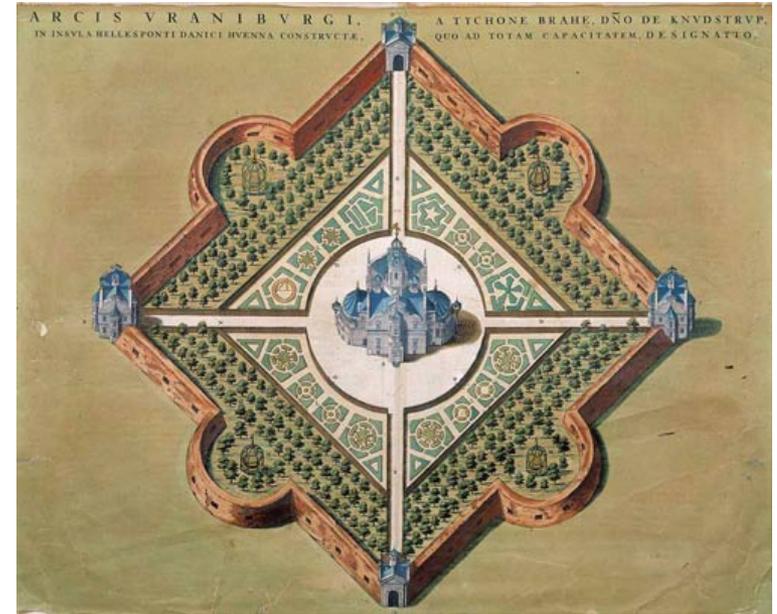
Tycho Brahe (1546 – 1601)



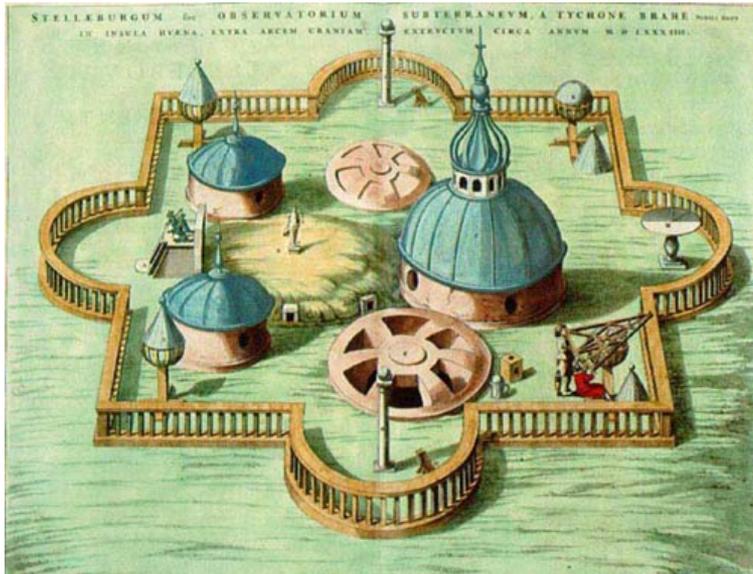
- 1546 Geboren in Knudstrup, Südschweden
- 1559 - 1566 Studien der Rhetorik, Philosophie, Astronomie, Medizin und Alchemie in Kopenhagen, Leipzig, Wittenberg und Rostock
- 1576 – 1597 Bau der beiden Sternwarten Uraniborg und Stjerneborg auf der Insel Hven und systematische Beobachtung der Gestirne
- 1599 – 1601 Kaiserlicher Mathematiker und Hofastronom am Hofe Rudolf II. in Prag.



Tycho Brahes Wirkungsstätten



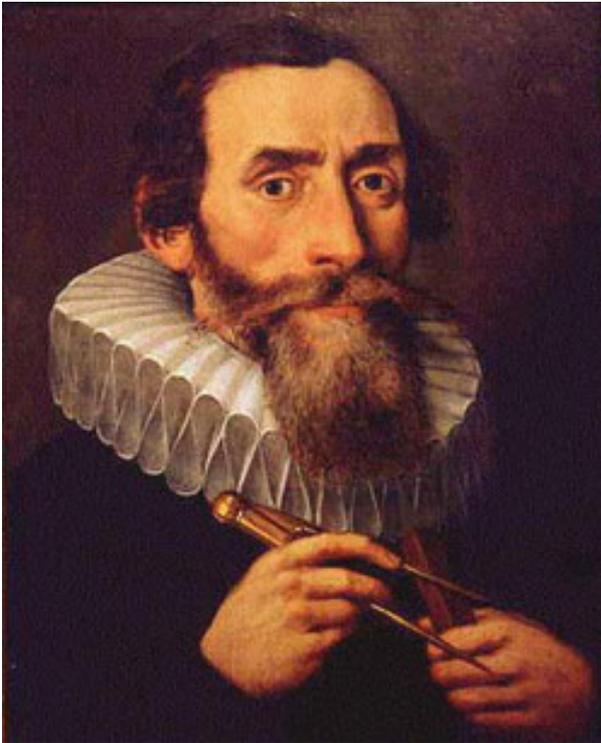
Uraniborg



Stjerneborg, Kupferstich aus dem Jahre 1663

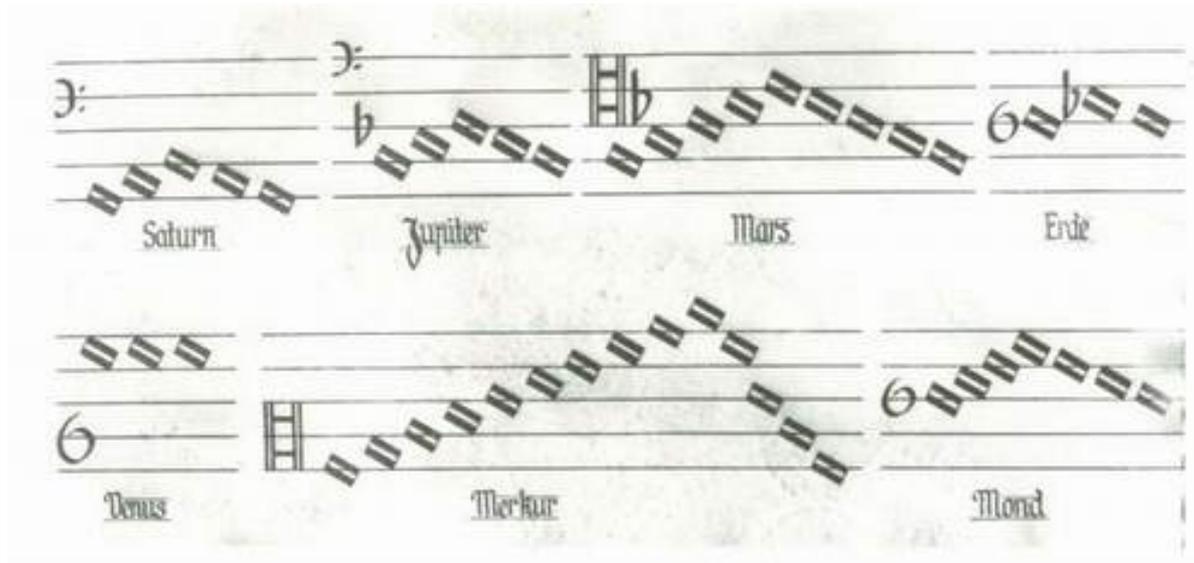


Johannes Kepler (1570 – 1630)



- 1570 Geboren in Weil der Stadt
- 1589 - 1593 Studium in Tübingen, zunächst alte Sprachen, dann Physik, Mathematik und Astronomie und später auch Theologie
- Ab 1600 arbeitet Kepler in Prag an der Auswertung der Braheschen Beobachtungen.
- 1609 Veröffentlichung der beiden ersten Keplerschen Gesetze in der „Astronomia Nova“,
- 1612 Kepler muss Prag aus religiösen Gründen verlassen, arbeitet zunächst in Linz, später in Sagan im Dienste Wallensteins.
- 1630 Tod in Regensburg
- 1618 – 1648 Dreißigjähriger Krieg

Keplers „Sphärenmusik“



In seinen Harmonices mundi ordnete Kepler jeder Planetenbahn eine entsprechende Melodie zu, die er aus den Bahndaten entwickelte.

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk

2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe

2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung

2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler

2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop

2.6 Der Prozess

2.7 Biographie: Galilei

2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung

2.9 Biographie: Newton

2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Das Galileische Fernrohr



Daten zu Galileis Fernrohren:

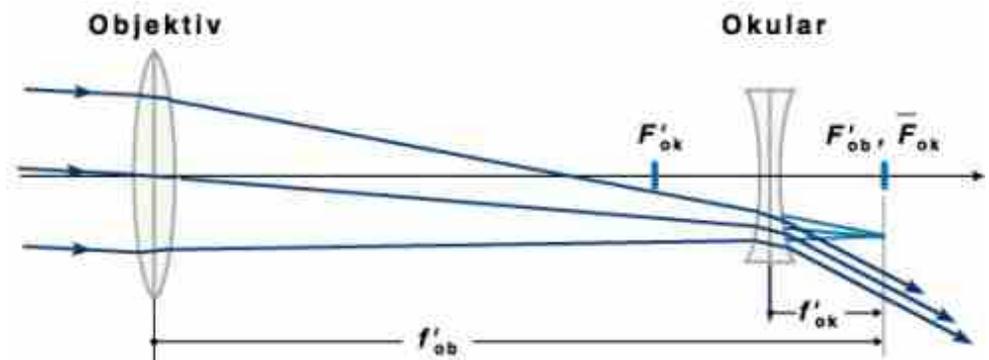
Länge: ca. 1,5 m

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

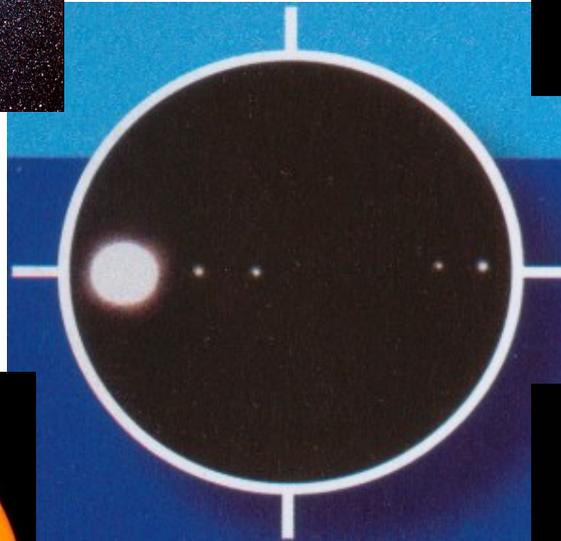
Galileis Himmelsbeobachtungen



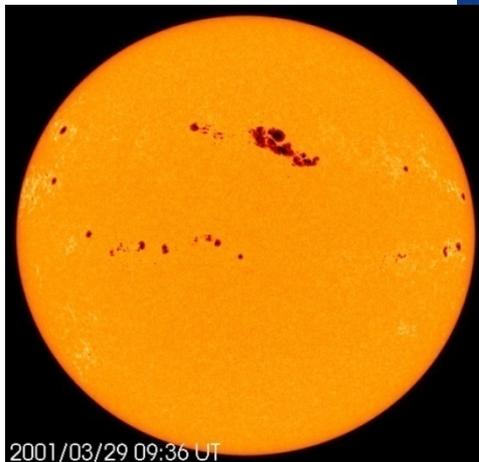
Milchstraße



Mondoberfläche



Jupitermonde



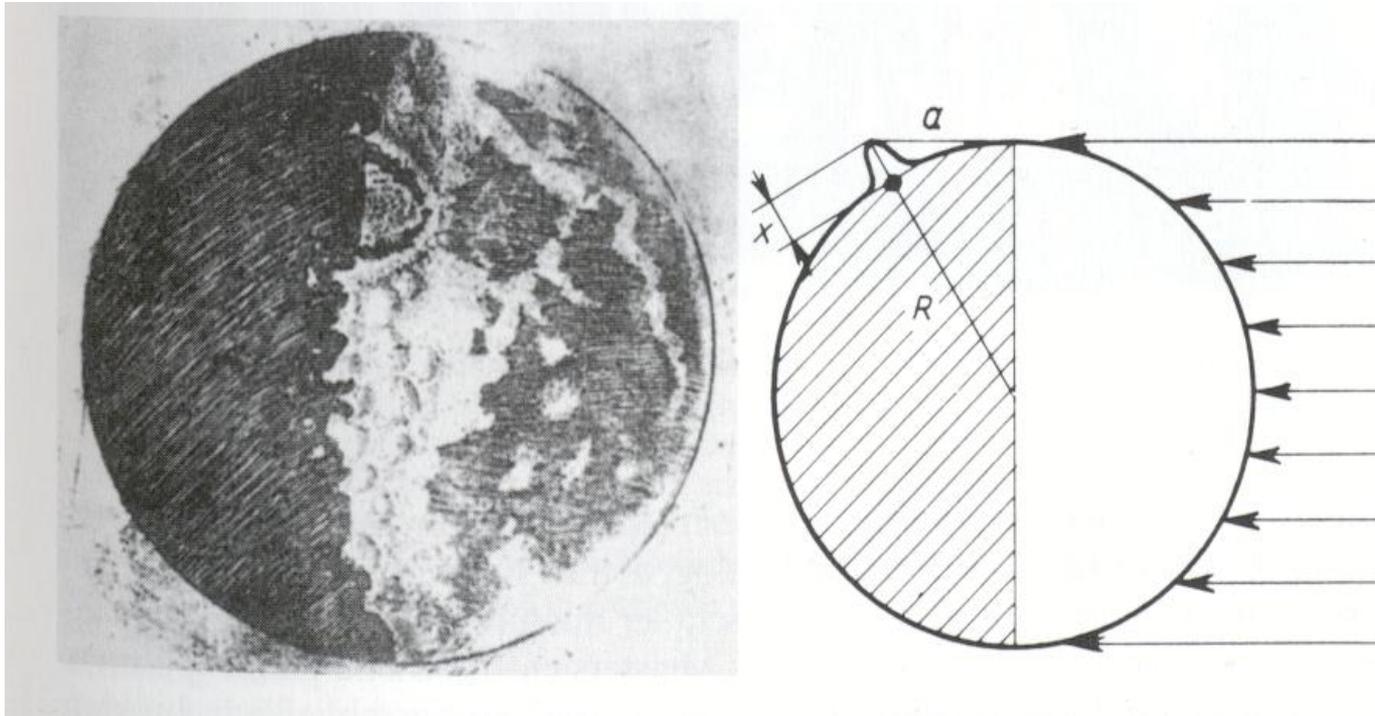
Sonnenflecken



Venusphasen

Die Ansicht der Mondoberfläche

(aus Galileis Dialogo)



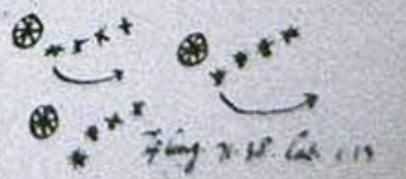
Aus der Größe der Schatten lässt sich die Höhe der Mondberge berechnen. (bis zu 10 km)

Sex^{mo} Principe.

Galileo Galilei, Humilis^s Servus Della Ser.^a V.^a inuigilan.
No. 2124, et de ogni spirito se bene no solo satisfare
staro che non della Lettera di Mad^{re}matica nelle Scu-
ole di Padova,

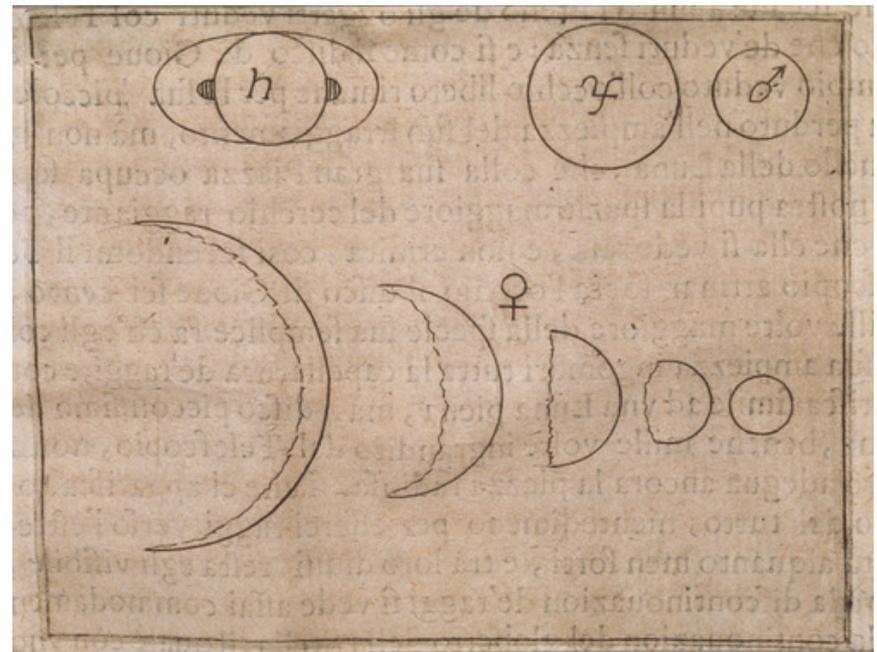
Inuere d'auere determinato di presentare al Sex^{mo} Principe
l'Orchiale et il p^{re}ncipe di firmamento inestimabile se ogni
ragione et in ista marittima o terrestre stimo di tenere qual-
che nuovo artificio nel maggior segreto et solam^e a disposizione
di S. Ser.^a L'Orchiale auuto dalle piu uide speculazioni di
pro, betaua in l'uantaggio di scoprire l'ogni et uole dell' inimic
p^{re}ncipe et piu di tempo prima di esse sopra noi et distinguendo
il numero et la qualita dei uasselli giudiare la sua forte
pallottarsi alla caccia et combattimento o alla fuga, o pure esser
nella campagna aperta uedere et particolar^{mente} distinguere ogni suo
moto et propriamento.

Feb 7. di gennaio
Gioue si uide usti
Feb 8. usti
Feb 12. si uide in tale uisione
Feb 13. si uide non uisibile in Gioue 4 stelle
Feb 14. è angelo
Feb 15. si uide in 7^a ora in uisibile la 4^a ora di
stante della 3^a il doppio uisibile
Lo spazio delle 3 uisibili non con
maggior del diametro di 7^a et con
uasi in linea retta.



Originalnotizen von Galilei

Links: u.a. Positionen der Jupitermonde
Unten: u.a. die Phasen der Venus



Beobachtung der Jupitermonde

Galileis erste Beobachtungen



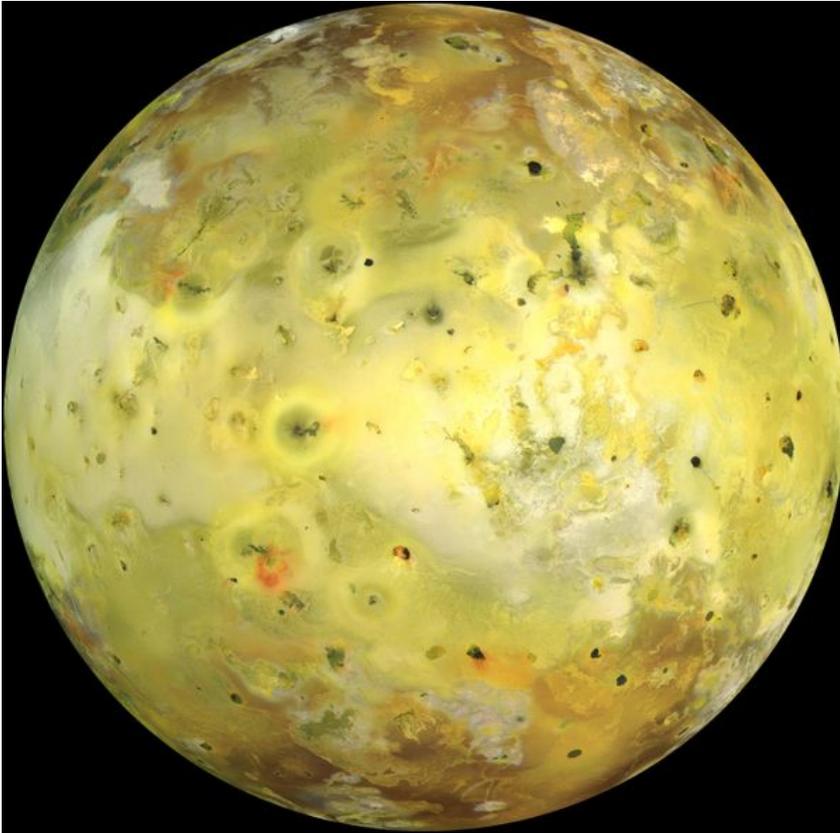
Foto aus neuerer Zeit



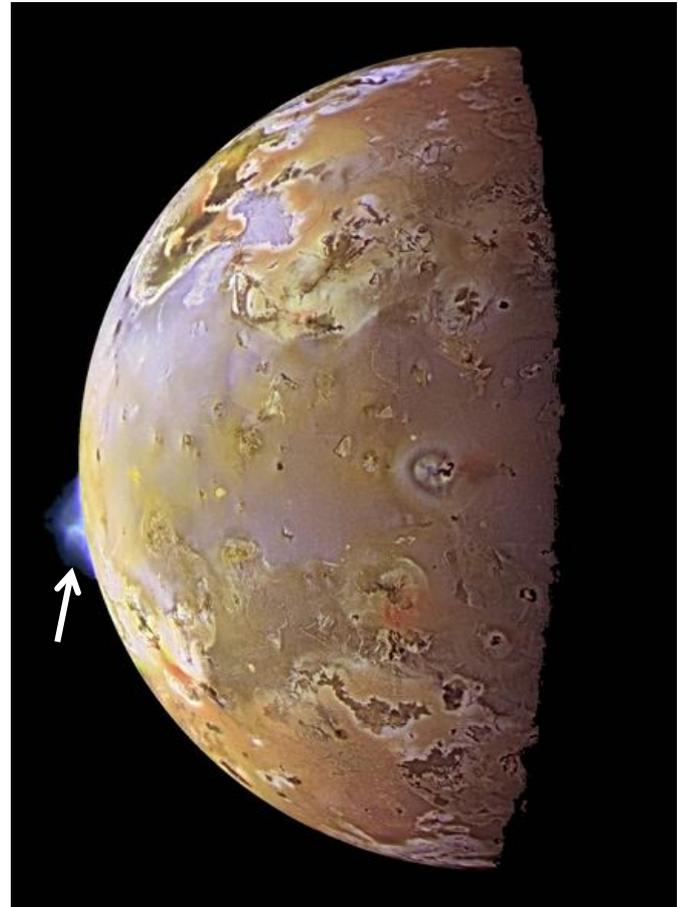
Name	Durchmesser	Bahnradius	Umlaufzeit
Io	3630 km, 1.2"	421 000 km	1.769 Tage
Europa	3138 km, 1.1"	672 000 km	3.551 Tage
Ganimedes	5262 km, 1.8"	1 072 000 km	7.155 Tage
Kallisto	4800 km, 1.6"	1 888 000 km	16.689 Tage

Der Durchmesser wird absolut in km und als scheinbarer Durchmesser in Bogensekunden bei geringster Distanz zur Erde angegeben.

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.

Milchstraße am südlichen Sternhimmel

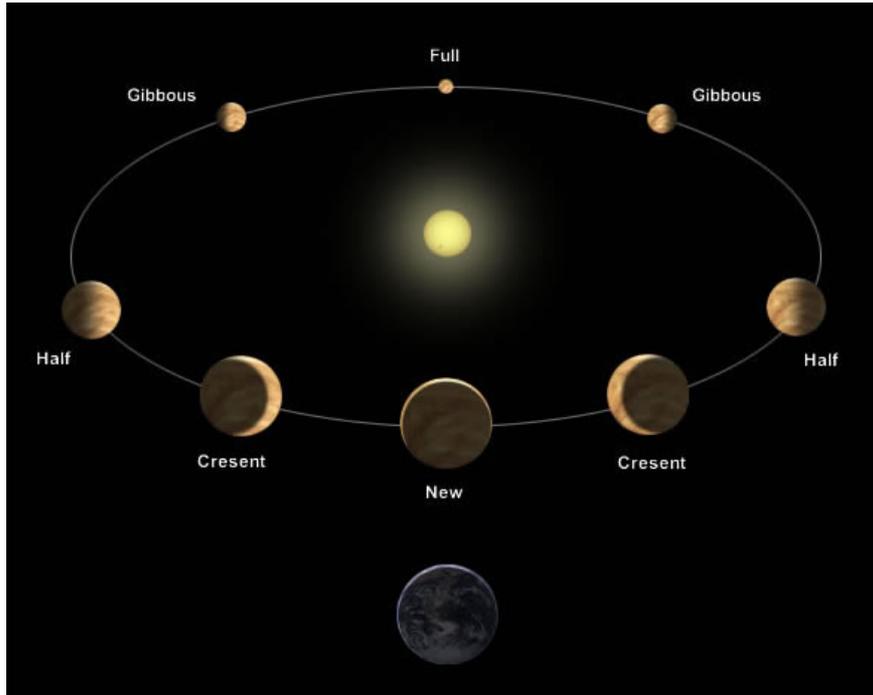


Adam Elsheimer (1578 – 1610)



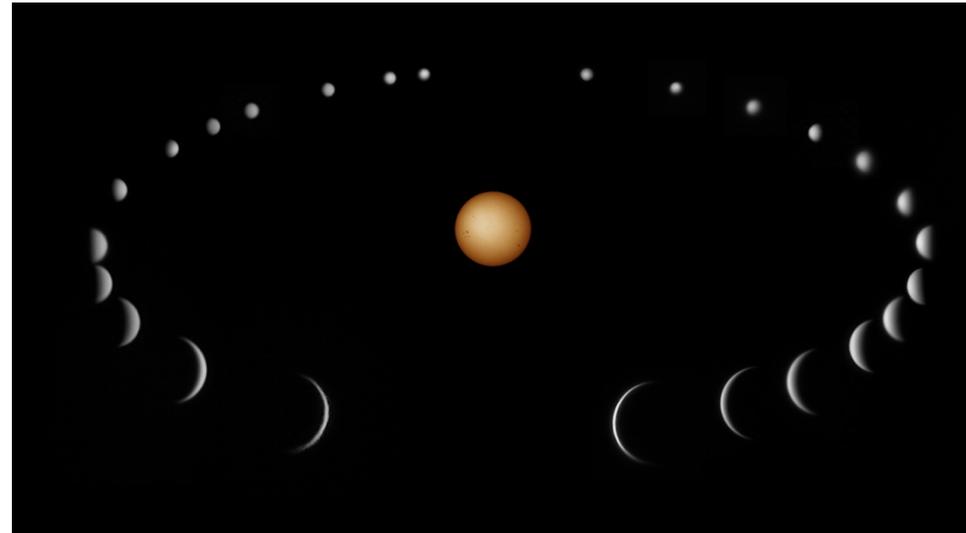
Das Bild "Die Flucht nach Ägypten" wurde 1609 gemalt, es ist wohl das letzte Bild von Elsheimer. Es ist auf der Rückseite signiert: *Adam Elsheimer fecit Romae 1609*. Aber diese Beschriftung stammt nicht, wie man neuerdings herausgefunden hat, von Adam Elsheimer. An der Echtheit des Bildes gibt es aber keine Zweifel. Das Bild hängt heute in München in der Pinakothek.

Die Phasen der Venus



Schematische Darstellung

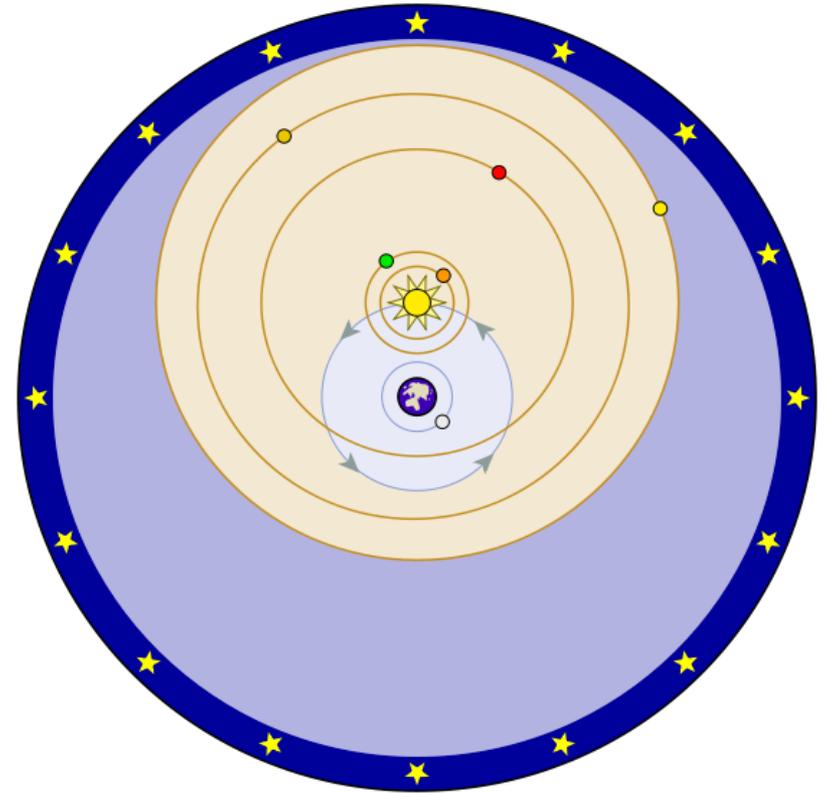
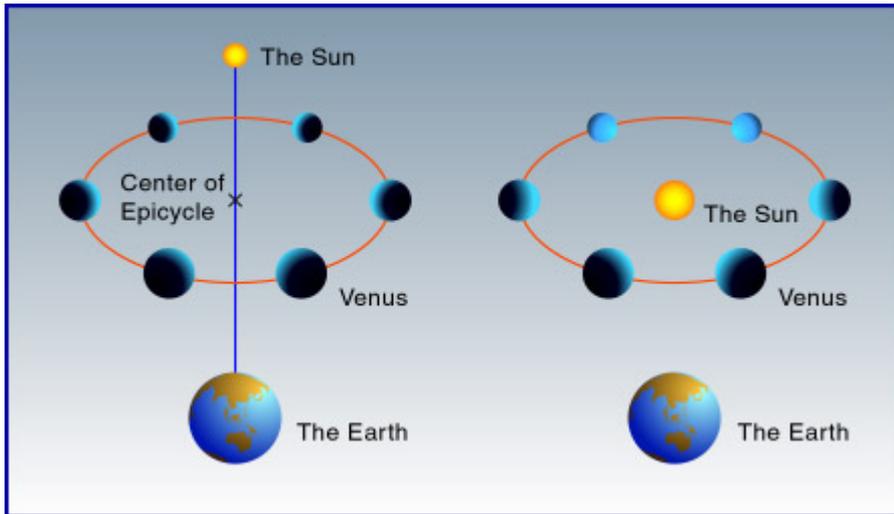
Durchmesser in größter Entfernung von der Erde: 10"
Durchmesser in kleinster Entfernung von der Erde: 50"
Siderische Umlaufdauer $T = 225$ d



Fotografien

Dave Smith took this wonderful compilation showing all of Venus's phases between July 2010 and January 2012. The Venus images were all taken in daylight using a Vixen FL102S refractor with a 2x barlow and DMK21 camera taking special care to avoid the Sun. The images were placed on an ellipse (not shown) at their correct distance from the Sun using SkyMap Pro.

Die Venusphasen in verschiedenen Systemen



Tycho Brahes Weltmodell

Galileo had four major discoveries:

- The mountain terrain on the Moon.
- The sunspots.
These two discoveries proved that the heaven is not perfect.
- Four satellites orbiting around Jupiter. So, there are other "centers" in the heaven. The four satellites are now called the Galilean satellites.
- Venus goes through a full set of phases, proving that it must orbit around the Sun, not the center of the epicycle.

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Galileo Galilei (1564 – 1642)

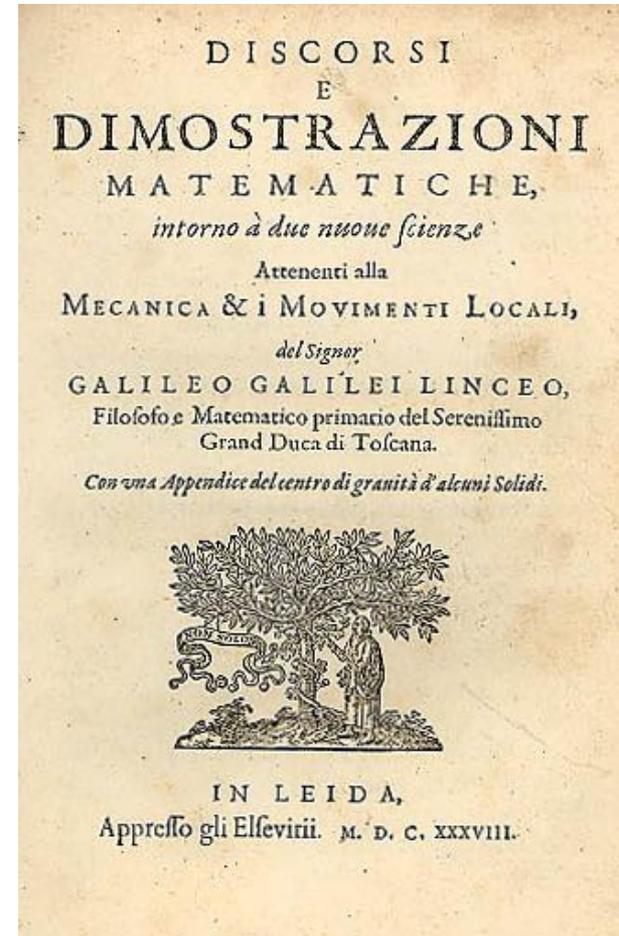


- 1564 in Pisa geboren
- ab 1581 Studium in Pisa: Medizin, Philosophie und Naturkunde;
kein Abschluss
- ab 1592 Professor in Padua: Experimente an der schiefen Ebene; Gesetz des freien Falls
- 1609 Bau eines Fernrohrs; Beginn einer neuen Ära der Astronomie
- 1610 Mathematiker und Philosoph des Großherzogs der Toscana
- 1632 Veröffentlichung des „Dialogo di due massimi sistemi“, die ein Jahr später zum Prozess führte.
- 1633 Erscheinen seines 2. Hauptwerkes „Discorsi“ in Leiden
- 1642 Tod in Arcetri bei Florenz

Galileis Hauptwerke



Dialogo, erschienen 1632 in Florenz,
nachgedruckt 1635 in Leiden
von links nach rechts: Aristoteles, Ptolemaios,
Kopernikus



Discorsi (1638)
erschienen in Leiden

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess**
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Zeittafel zu dem Prozess gegen Galilei

- 1543 Das Werk De Revolutionibus des Kopernikus erscheint
- 1582 Die Kalenderreform des Papstes Gregor beruht z.T. auf Berechnungen des Kopernikus
- 1609 Beobachtungen des Galilei mit dem Teleskop
- 1616 De Revolutionibus wird nicht auf den Index gesetzt, sondern „suspendiert“, d.h. seine Thesen dürfen nur als Hypothese gelehrt werden. Darüber wird auch Galilei von Kardinal Bellarmin informiert.
- 1632 Galileis „Dialog über die zwei Weltsysteme“ erscheint mit der Druckerlaubnis des Inquisitors von Florenz, ein halbes Jahr später Protest des Chef-Inquisitors von Rom
- 1633 Prozess gegen Galilei in Rom nicht wegen Ketzerei, sondern nur „wegen Ungehorsam“. Galilei widerruft die Kopernikanische Lehre und wird zu lebenslänglichem Hausarrest verurteilt.
- 1992 Offizielle Rehabilitation Galileis durch Papst Johannes Paul II

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung**
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Ableitung der Form der Gravitationskraft

Zentripetalkraft bei einer Kreisbewegung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit:

$$F_z = m \cdot \omega^2 \cdot R$$

wobei $\omega = 2\pi/T$

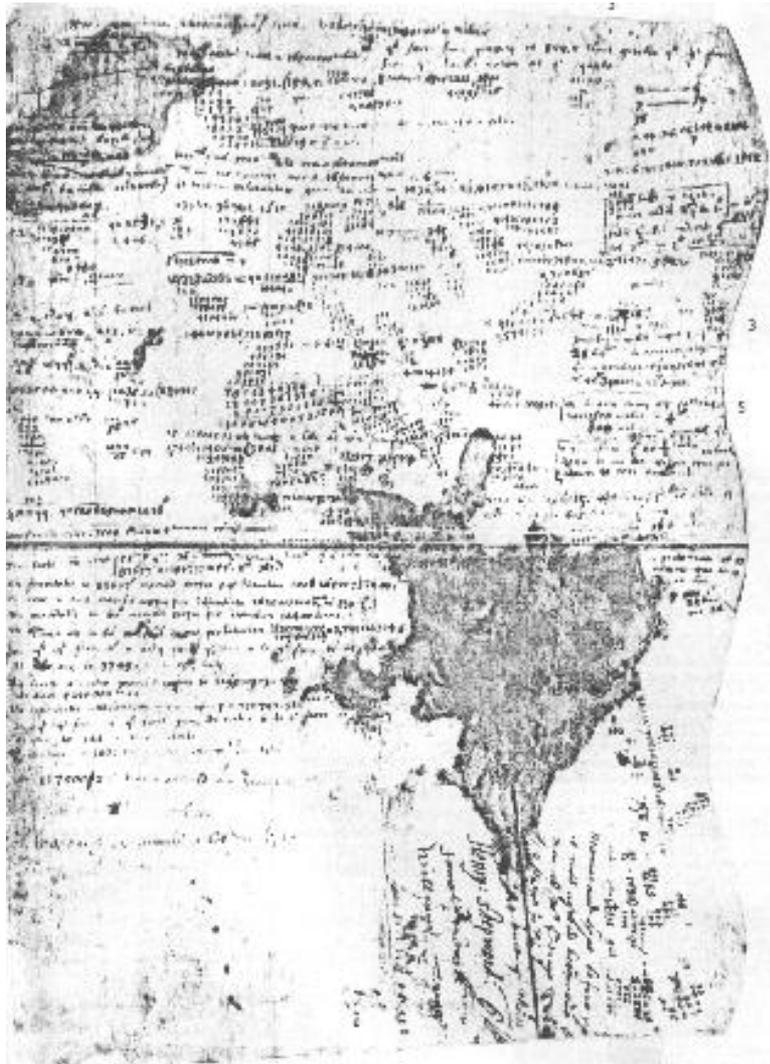
Im Gleichgewicht gilt $F_z = \text{Gravitationskraft} = F_G$

benutze Keplers 3. Gesetz: $T^2/R^3 = \text{const.}$

$$F_z = m \cdot (2\pi/T)^2 \cdot R \sim m R / T^2 \sim m R / R^3 \sim m/R^2 \sim F_G$$

Auf der Erde $= m \cdot g$; $g = G \cdot M_S / (R_E)^2$

$$F_G = g (R_E/R)^2$$



Newtons Schmierzettel

Ein zum Ausfertigen eines Mietvertrages benutztes Pergamentblatt hat Newton in den Jahren 1665-66 als Schmierzettel gedient. Er enthält Rechnungen zu dem Vergleich von Schwerkraft auf der Erde und Zentripetalkraft des Mondes.

Aus Newtons Hauptwerk: „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ (1687)
(abgekürzt: „Principia“)

Axiome oder Gesetze der Bewegung

1. Gesetz: Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.
2. Gesetz: Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.
3. Gesetz: Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper aufeinander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung .

$$m \cdot a = F$$

Die Erforschung des Planetensystems

Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

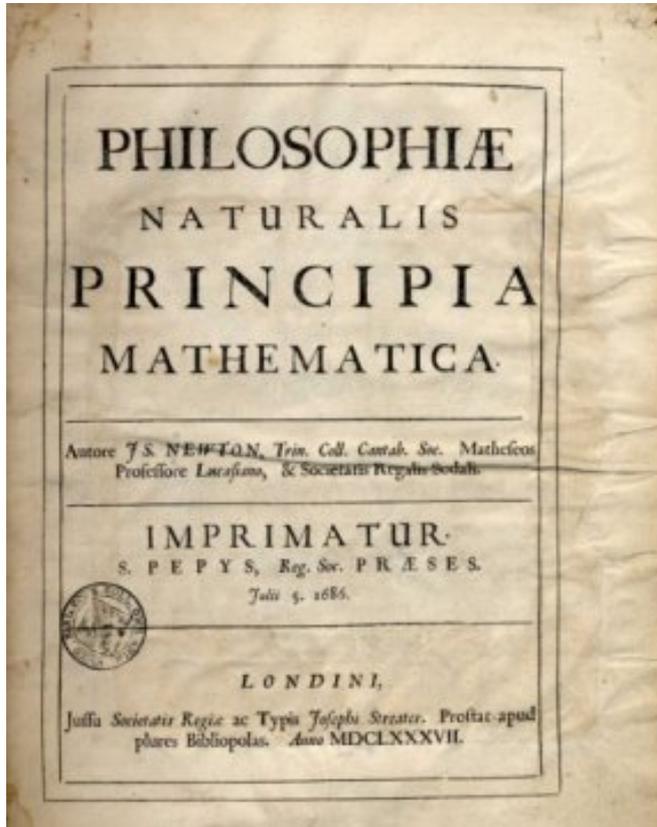
- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Isaac Newton – Stationen seines Lebens

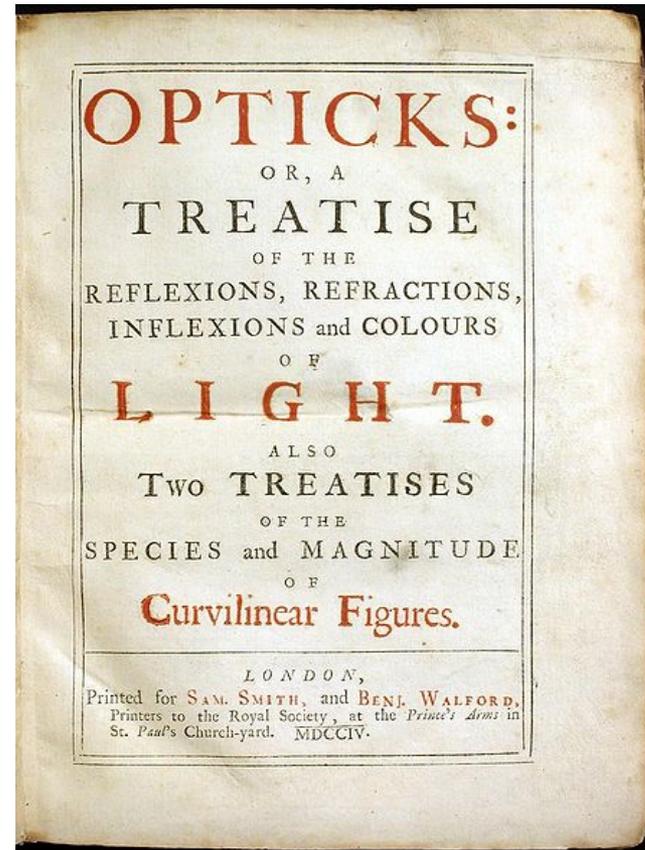


- 1643 in Woolthorpe in Lincolnshire geboren,
- 1661 Studienbeginn im Trinity College in Cambridge mit dem Ziel eines juristischen Examens. Kennenlernen der Schriften von Kopernikus, Galilei und Kepler.
- 1665 Anni mirabiles: Rückkehr in seinen Heimatort wegen der Pest. Grundlagen der Infinitesimalrechnung, Gravitationskraft und die Gesetze der Mechanik
- 1669 Nachfolger seines Lehrers Barrow auf dem Lucasischen Lehrstuhl
Experimentelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Optik
- 1672 Mitglied der Royal Society, Erste Arbeit „Licht und Farbe“.
- 1687 Veröffentlichung der „Pincipia“
- 1693 Beendigung seiner wissenschaftlichen Arbeit.
- 1696 Aufseher bei der königlichen Münze, Leitung 1699
- 1703 Präsident der Royal Society
- 1705 Erhebung in den Adelsstand durch Königin Anne
- 1727 Tod und Beisetzung in der Westminster Abbey

Newtons Hauptwerke – die Principia und Opticks



Veröffentlicht 1687 in London



Veröffentlicht 1704 in London

Die Erforschung des Planetensystems

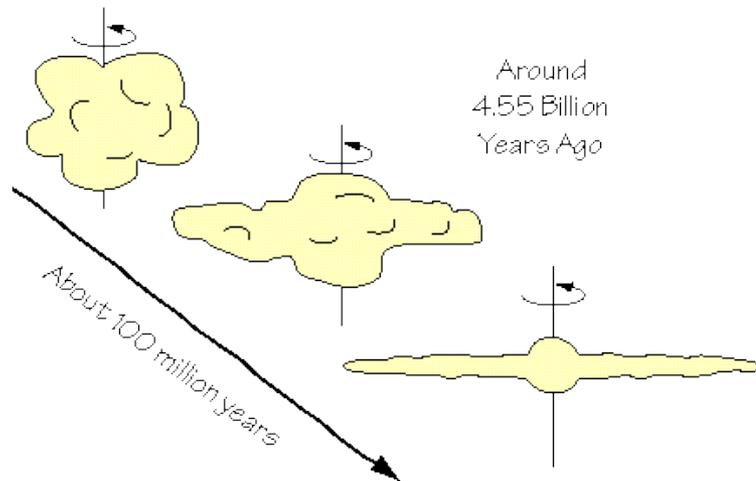
Zweiter Tag: Die Entwicklung nach Kopernikus

- 2.1 Die Aufnahme von Kopernikus Werk
- 2.2 Die präzisen Messungen des Tycho Brahe
- 2.3 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung
- 2.4 Doppelbiographie: Brahe/Kepler
- 2.5 Galileis Entdeckungen mit dem Teleskop
- 2.6 Biographie: Galilei
- 2.7 Der Prozess
- 2.8 Die Gravitationskraft und die Gesetze der Bewegung
- 2.9 Biographie: Newton
- 2.10 Erste Hypothese über die Entstehung des Planetensystems

Die Entstehung unseres Planetensystems

Immanuel Kant (1724-1804) und Pierre Laplace (1749 – 1827)

- The Solar System coalesced from a rotating gas cloud formed during a supernova.



(Zeitangaben: modernen Untersuchungen mithilfe radioaktiver Kerne)

