

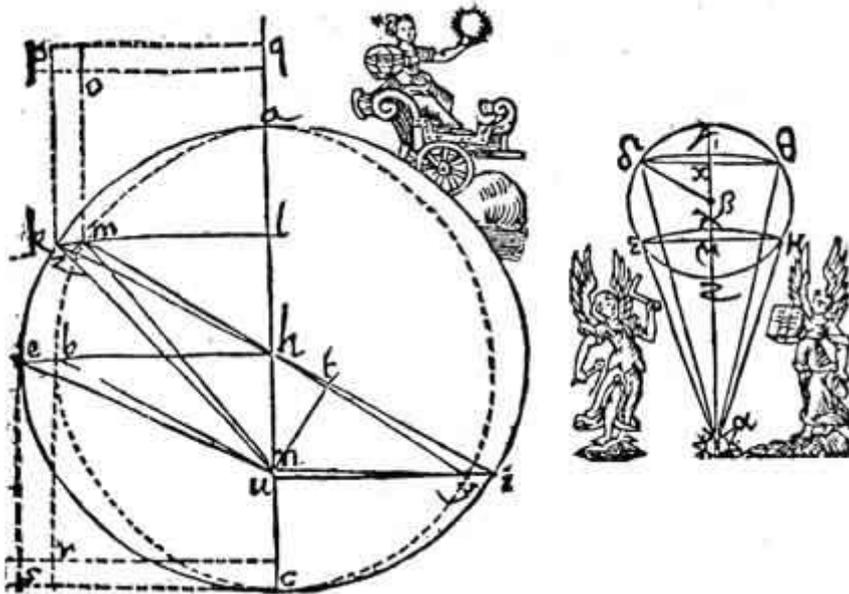


*Tycho Brahe 1546-1601*



*Johannes Kepler 1571-1630*

## Keplers Entdeckung der Planetengesetze

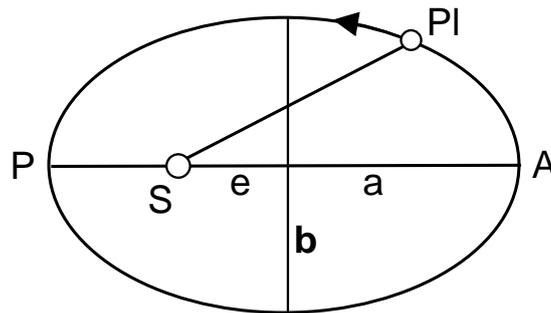


*Astronomia nova Kapitel 59*

## Die (klassischen) keplerschen Gesetze

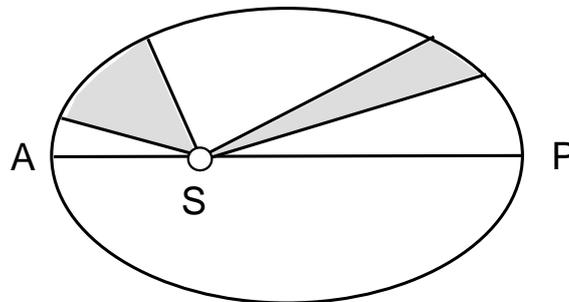
### 1. Gesetz

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.



### 2. Gesetz

Die von der Sonne zu einem Planeten gezogene Linie, der Fahrstrahl, überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.



### 3. Gesetz

Die Quadrate der Planetenumlaufzeiten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnellipsen:

$$T_1^2 : T_2^2 = a_1^3 : a_2^3$$

## Keplers Entdeckung der Planetengesetze 2

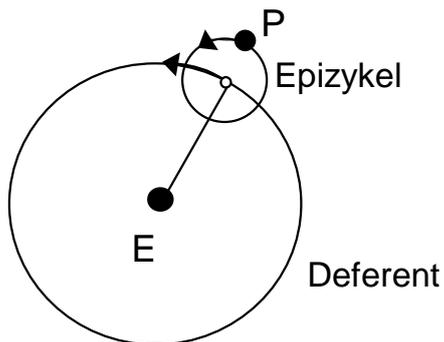
### Zeittafel

384-322 v.Z.	Aristoteles	<i>Dogma der gleichförmigen Kreisbewegung</i>
365-300 v.Z.	Euklid	„Elemente“ (erfolgreichstes Mathematikbuch aller Zeiten)
287-212 v.Z.	Archimedes	<i>Flächen- und Volumenberechnungen</i>
262-190 v.Z.	Apollonius	<i>Kegelschnitte</i>
85-165	<u>Ptolemäus</u>	„Almagest“ <i>Geozentrisches Weltbild, Epizykeltheorie</i>
ab 1100	<i>Aneignung der antiken Schriften</i>	
1248-52	Alfons X. v. Kastilien	<u>Alfonsinische Tafeln</u> (erarbeitet von 50 arabischen, jüdischen u. christlichen Gelehrten)
1436-76	Regiomontanus	<i>Ausbau d. ebenen und sphärischen Geometrie, 7-stellige Tabellen der Winkelfunktionen</i>
<u>1543</u>	<u>Kopernikus</u> (1473-1543)	„De revolutionibus orbium coelestium“ <i>Heliozentrisches Weltbild, (benötigt aber auch Epizykel)</i>
1546-1601	<u>Brahe</u>	<i>Astronomische Messungen (ohne Fernrohr) u.a. der Marsbewegung mit höchster Genauigkeit (2 statt bisher 8 Winkelminuten). Eigenes Planetensystem (Kompromiss)</i>
1564-1642	Galilei	<i>Fallgesetze, Fernrohrbeobachtung (Jupitermonde), Anhänger d. Kopernikus, (nicht der Keplergesetze)</i>
ab 1614	<i>Logarithmentafeln (u.a. Neper)</i>	
1571-1630	<u>Johannes Kepler</u>	
1596	„Mysterium cosmographicum“ <i>spekulatives Weltmodell</i>	
1601	<i>Kaiserlicher Hofmathematiker (Nachfolger von Brahe), Auftrag für die Rudolphinischen Tafeln (Rudolph II.)</i>	
<u>1609</u>	„ <u>Astronomia Nova</u> “	1. Gesetz (1605) + 2. Gesetz (1602)
1611	„Dioptrice“	<i>geometrische Optik, Theorie des astron. Fernrohrs</i>
1618-21	„ <u>Epitomes astronomiae Copernicanae</u> “ (auf dem Index des Vatikan)	
<u>1619</u>	„ <u>Harmonices mundi</u> “	3. Gesetz (1618)
1627	„ <u>Tabulae Rudolphinae</u> “ <i>Astronomisches Lebenswerk</i>	
1629	Lehrstuhl der Mathematik an der Uni Rostock (Wallenstein)	
<u>1687</u>	<u>Newton</u> (1643-1727)	„ <u>Principia mathematica</u> “ <i>Gravitationsgesetz, Klassische Mechanik, Infinitesimalrechnung.</i>

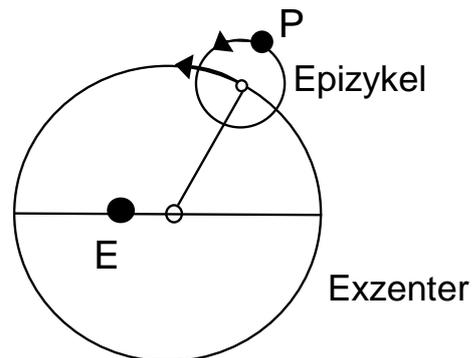
### Epizykeltheorie nach Ptolemäus

Zusammensetzung der scheinbaren Bewegung der Planeten aus gleichförmigen Kreisbewegungen.

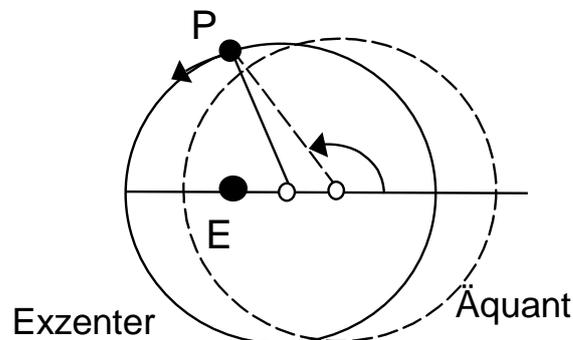
#### 1. Deferent und Epizykel



#### 2. Exzenter und Epizykel



#### 3. Exzenter und Äquant



Durch die Kombination dieser Elemente, ggf. nach Einführung weiterer Epizykel, Exzenter und Äquanten, konnten die Planetenbewegungen mit für damalige Zeit befriedigender Genauigkeit beschrieben werden. Das ptolemäische System hatte für 1500 Jahre Bestand!

Jedoch lieferte dieses (bewundernswerte) komplizierte „Räderwerk“ keine physikalische Erklärung der Phänomene.

**Epizykeltheorie: formale Beispiele**

Koordinatenmittelpunkt O (Sonne, Erde)

Exzenter-Kreis mit Mittelpunkt M(d,0) und Radius R

(Der Exzenter heißt für d = 0 Deferent)

Äquantenkreis mit dem Mittelpunkt Ä(d+d1 , 0) und Radius R

Auf dem Äquantenkreis bewegt sich der Punkt A

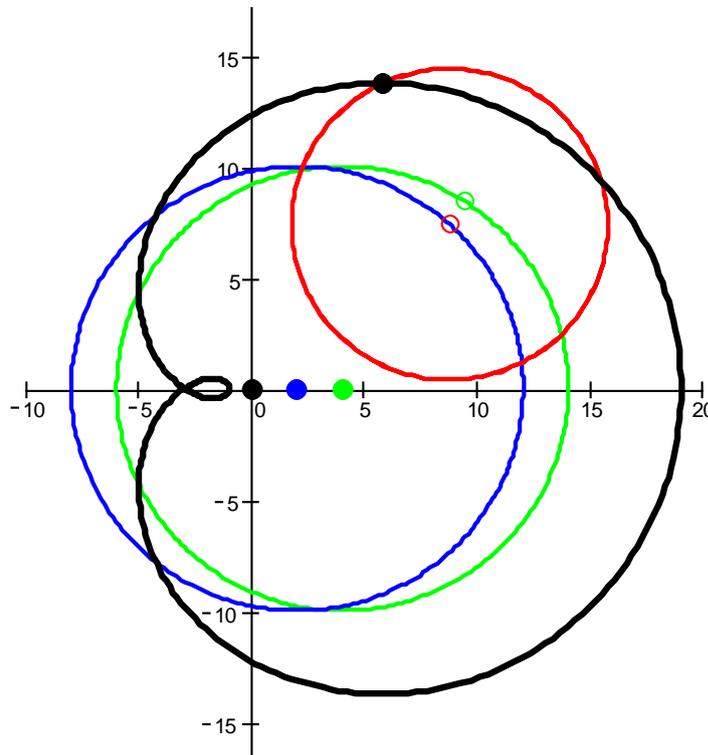
Epizykel-Kreis mit dem Mittelpunkt C auf dem Exzenter und Radius r

C liegt auf ÄÄ Auf dem Epizykel bewegt sich der Planet P

Winkelgeschwindigkeit von A:  $\Omega$

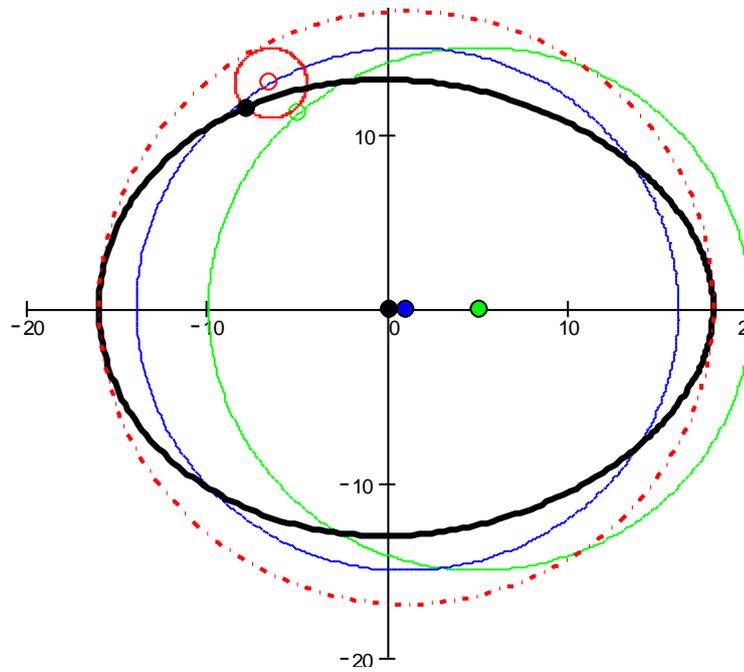
Winkelgeschwindigkeit von P:  $\omega$

1. Bahn mit rückläufiger Bewegung (  $R:r = 10:7$  ,  $\Omega:\omega = 1:2$  ,  $d:d1 = 2:2$  )



## Keplers Entdeckung der Planetengesetze 4

### 2. Eiförmige Bahn (angenäherte Ellipse) ( $R:r = 15:2$ , $\Omega:\omega = 1:-1$ , $d:d1 = 1:4$ )



Animationen

## Die Weltsysteme von Kopernikus und Brahe

### **Das System des Kopernikus („Kopernikanische Wende“)**

1. Die Planeten bewegen sich auf exzentrischen Kreisen um die ruhende Sonne. Die Reihenfolge folgt aus den Umlaufzeiten.
2. Die Erde ist ein Planet. Die Erde rotiert und der Sternhimmel ruht.

*„Die erste und oberste von allen Sphären ist die der Fixsterne, die sich selbst und alles andere enthält und daher unbeweglich ist.*

*Den vierten Platz [von außen] in der Reihe nimmt der Kreislauf ein, in dem die Erde mit der Mondbahn als Epizykel enthalten ist.*

*In der Mitte aber von allen steht die Sonne,... von wo aus sie das Ganze zugleich beleuchten kann.“*

De revolutionibus orbium coelestium. (Nach K.Simonyi)

3. Das System erlaubt einfache (prinzipiell richtige) Beschreibungen der scheinbaren Bewegungen am Himmel, u.a. der rückläufigen Planetenbewegungen.
4. Das Beharren auf Kreisbahnen zwingt aber Kopernikus dazu, für die Bahnbeschreibung (bis zu 30) Epizykel zu verwenden.  
Die nach dem kopernikanischen System 1551 von Reinhold aufgestellten „prutenischen“ Planetentafeln ergaben bzgl. der alfonsinischen Tafeln kaum eine Verbesserung!

*Neben dem Gegensatz zur kirchlichen Lehre und den Vorbehalten aus täglicher und überkommener Anschauung war Punkt 4 ein wichtiges Argument für die ablehnende Haltung auch vieler Gelehrter!*

### **Das System des Tycho Brahe**

1. Die Planeten bewegen sich um die Sonne.
2. Die Sonne und der Mond bewegen sich um die ruhende Erde.

*Brahe vermeidet den Gegensatz zur kirchlichen Lehre.*

*Für einen Beobachter auf der Sonne ergibt sich aber das kopernikanische Planetensystem, wie Kepler selbst ausführt:*

*„...ist es leicht zu verstehen, dass für einen auf die Sonne versetzten Beobachter – einerlei welche Bewegung sie ausführt – die Erde scheinbar eine Kreisbahn zwischen den Planeten durchläuft, selbst wenn wir Brahe zuliebe einräumen, sie befände sich in Ruhe. Es ist also auch jedem, der sich mangels der dazu nötigen Einsicht die Bewegung der Erde ... nicht vorstellen kann, trotzdem möglich, sich an der ... göttlichen Konstruktion zu erbauen.“*

Harmonices mundi... (nach Simonyi)

## Keplers „Neue Astronomie“

Die *Astronomia nova* (1609) ist ein Meilenstein auf dem Weg zur modernen Himmelsmechanik und des naturwissenschaftlichen Denkens.

Der vollständige Titel lautet (zu Recht!)

*NEUE ASTRONOMIE.*

*Ursächlich begründet oder Physik des Himmels.*

*Dargestellt in Untersuchungen über die Bewegungen des  
Sternes Mars.*

*Auf Grund der Beobachtungen des Edelmannes Tycho Brahe.*

Das Werk besteht aus 5 Teilen in 70 Kapiteln.

Vorangestellt sind u.a. eine Einleitung, eine Übersichtstafel und die ausführliche Inhaltsbeschreibung aller Kapitel. Die Einleitung enthält einen Rat an den Leser:

*„Wer aber zu einfältig ist, um die astronomische Wissenschaft zu verstehen, oder zu kleinmütig, um ohne Ärgernis für seine Frömmigkeit dem Kopernikus zu glauben, dem gebe ich den Rat, er möge die Schule der Astronomie verlassen ...“*

Kepler lässt den Leser ausführlich an der Entwicklung der Ergebnisse teilhaben.

Einige Inhaltsangaben:

- **Teil 1:** Darstellung und Untersuchung der Gleichwertigkeit der Planetentheorien von Ptolemäus, Kopernikus und Brahe. Annahme der Sonne als Weltmittelpunkt.
- **Teil 2:** Marsoppositionen, tägliche Parallaxe des Mars, Knoten und Neigung der Marsbahn. Im Mittelpunkt steht die Untersuchung und Verwerfung der Kreisbahntheorie.
- **Teil 3:** Bewegung von Sonne und Erde, Nachweis des Radiensatzes, erste Einführung des Flächensatzes (2. Gesetz). Physikalische Untersuchung zur (magnetischen!) Bewegungskraft der Sonne.
- **Teil 4:** Die Marsbahn ist nicht kreisförmig! Ovalhypothese, Verwerfung. Richtiges Abstandsgesetz (2. Gesetz) und eine physikal. Begründung. **Kapitel 59/60:** Ellipsensätze. Die Marsbahn ist eine Ellipse! (1. Gesetz). Ellipsengleichung, Keplergleichung, Keplerproblem.
- **Teil 5:** Untersuchungen über die Breite. Knotenlinie geht durch die Sonne, Neigung der Marsbahn, Bewegung der Knoten und Apsiden, ....

Die *Astronomia nova* war für den Kreis der Gelehrten bestimmt.

*„Für den gemeinen Pöfel, für Menschen von Schulbänken niederen Ranges“*  
verfasste Kepler das mehrbändige Werk

*Epitomes astronomiae Copernicanae* (*Abriss der kopernikanischen Astronomie*).

Diese schrittweise von 1618 - 1621 erschienene „populärer“ Darstellung seiner Ergebnisse diente der Verbreitung der neuen Lehre.

Im Gegensatz zur *Astronomia nova* wurde dieses Buch schnell vom Vatikan auf den Index der verbotenen Bücher gesetzt, was Kepler jedoch nicht hinderte, die fehlenden Bände drucken zu lassen.

## Die Bestimmung der Erd- und Marsbahn

Die Planetenpositionen sind nur relativ aus der Sicht der Erde messbar. Daraus sind die wahren Planetenbahnen bestimmbar, wenn die Erdbahn bekannt ist.

Kepler entnahm die scheinbare Orte und Zeiten Brahes Beobachtungen und vollzog folgende Schritte (*Astronomia nova*):

### 1. Ermittlung der Erdbahn

bei unbekannter Marsbahn (!) aber bekanntem Marsjahr = 687 Tage.

Alle 687 Tage hat der Mars die gleiche Position  $M1 = M2$  auf seiner Bahn. Die Erde hat jedoch die verschiedene Bahnpositionen  $E1$  und  $E2$ .

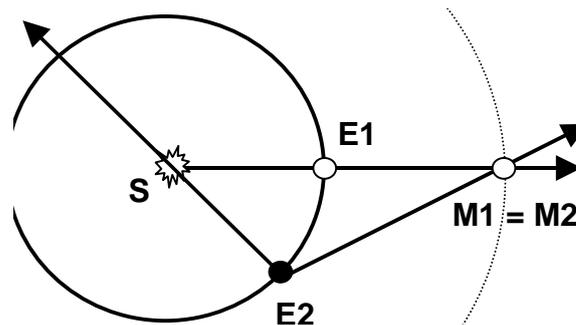
$E2$  ist aus Winkelmessungen konstruierbar:

- Setze (für eine Marsopposition) willkürlich die Strecke  $SM1$  fest.
- Messe aus der Position  $E2$  die Winkel  $\alpha = \angle S E2 M$ ,  $\beta = \angle E2 M E1$  und berechne  $\gamma = \angle E2 S E1$ .
- Die Strahlen von  $S$  und  $M$  unter den Winkeln  $\gamma$  und  $\beta$  schneiden sich in  $E2$ .

**Gemerkt:**

Zeitpunkte  $E1, E2$

→  $E = E(t)$



- Kepler erhielt eine (in der Messtoleranz annehmbare!) gering exzentrische Kreisbahn und setzte den unbekanntem Radius  $R_E = 1 (\cong 1 \text{ AE})$ .

Genauer: Zur Vermeidung von Dezimalbrüchen  $R = 100\,000$ .

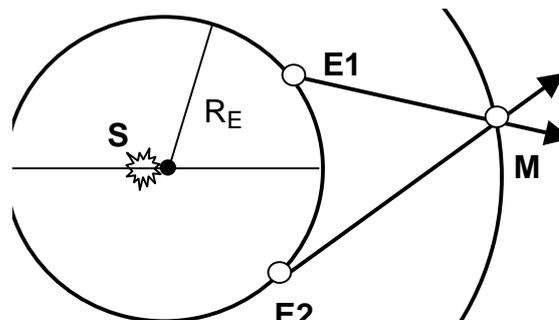
### 2. Ermittlung der Marsbahn

- Wahl zweier Erdpositionen auf der Erdbahn im Abstand von 687 Tagen.
- Ablesen der zugehörigen Richtungen, in denen der Mars gesehen wurde.
- Der Schnittpunkt  $M$  ist ein Punkt auf der Marsbahn.

**Gemerkt:**

Zeitpunkt  $E1 (M1)$

→  $M = M(t)$



## Keplers Entdeckung der Planetengesetze 7

Hinweis:

Zusammenhang zwischen

**siderischer Umlaufzeit  $T_{\text{sid}}$**  (gleiche Bahnposition aus Sicht der Sonne) und **synodischer Umlaufzeit  $T_{\text{syn}}$**  (von Opposition zu Opposition) des Mars und der Umlaufzeit  $T_E$  der Erde:

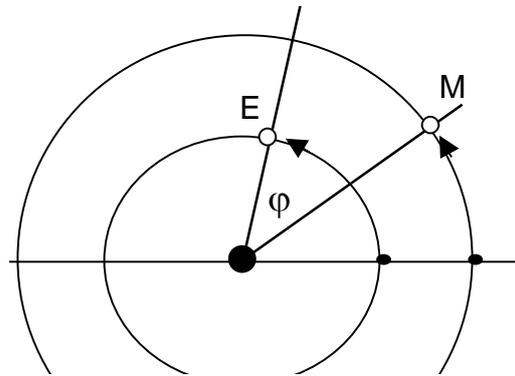
In der Zeit  $t$  läuft die Erde dem Mars um den Winkel  $\varphi$  voraus

$$\varphi = (\omega_{\text{Erde}} - \omega_{\text{Mars}}) \cdot t = \left( \frac{2\pi}{T_E} - \frac{2\pi}{T_{\text{sid}}} \right) \cdot t .$$

Von Opposition zu Opposition sind

$$t = T_{\text{syn}} \text{ und } \varphi = 2\pi .$$

Also gilt 
$$\frac{2\pi}{T_{\text{syn}}} = \frac{2\pi}{T_E} - \frac{2\pi}{T_{\text{sid}}} .$$



Daraus folgt 
$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{syn}}} \text{ und } T_{\text{sid}} = \left( \frac{1}{365,25} - \frac{1}{779,9} \right)^{-1} = 687 \text{Tage} .$$

### Das zweite keplersche Gesetz (Flächensatz)

- Kepler fand das Gesetz an der Erdbahn vor den Untersuchungen der Marsbahn.
- Für die veränderliche Bahngeschwindigkeit suchte er eine (von Exzentrern und Äquanten unabhängige) in der Sonne liegende „physikalische“ Begründung!
- Aus den Beobachtungswerten schloß er auf umgekehrte Proportionalität zwischen Geschwindigkeit  $v$  der Erde und Abstand  $r$  von der Sonne:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \sim \frac{1}{r} \quad \text{oder} \quad r \cdot v = \text{konst.}$$

Die Sonne erzeugt die Rotation; die Wirkung nimmt mit dem Abstand ab.

- Aufgrund des veränderlichen Abstands zum zurückgelegten Bogen  $\Delta s$  wählte er als Maß für die benötigte Zeit  $\Delta t$  die Summe der Abstände.
- Zur „Vereinfachung“ der Rechnung ersetzte er die Summe durch die Winkelfläche  $\Delta A$ :

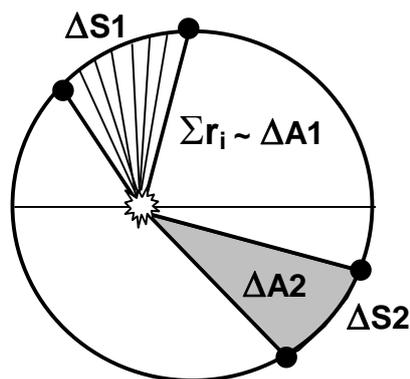
$$\Delta t \sim \sum r_i \sim \Delta A.$$

Dies ist in Anlehnung an Archimedes eine Vorform der Integration.

- Das so gefundene richtige Gesetz war für Kepler zu Beginn nur eine praktikable Näherung.

*„Unvollkommenes, jedoch für die Sonnen- oder Erdbahn ausreichendes Verfahren zur Berechnung ... auf Grund der physikalischen Hypothese. Da ich mir bewusst war, dass es unendlich viele Punkte auf dem Exzenter und entsprechend unendlich viele Abstände gibt, kam mir der Gedanke, dass in der Fläche des Exzentrers alle diese Abstände enthalten seien.“*

Astronomia nova



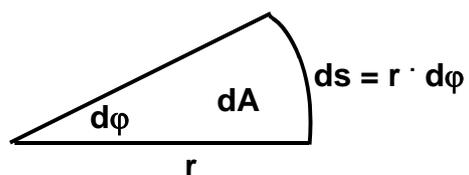
$$\Delta t_1 = \Delta t_2$$

$$\rightarrow \Delta A_1 = \Delta A_2$$

$$\rightarrow \Delta S_1 > \Delta S_2$$

Differentialansatz:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r^2 d\varphi}{dt} = \frac{1}{2} \cdot r \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2} \cdot r \cdot v = \text{konst.}$$







## Keplers Entdeckung der Planetengesetze 9

Mit  $\underline{x = a \cdot \cos(E) = r \cdot \cos(\alpha) - e}$  folgen aus (3)

a) die keplersche Ellipsengleichung

$$r = a + e \cdot \cos(E)$$

b) die Brennpunktgleichung

$$r = \frac{a^2 - e^2}{a - e \cdot \cos(\alpha)}$$

Die Winkel  $E$  und  $\alpha$  nennt Kepler exzentrische und wahre Anomalie.

In der modernen Literatur werden die Winkel nicht vom Aphel  $A$  sondern vom Perihel  $P_e$  aus gemessen. In den Formeln ergeben sich Vorzeichenänderungen.

## Die Keplergleichung und das Keplerproblem

Mittels grafischer Methoden zur Berechnung von Flächen fand Kepler für den Flächensatz eine Beziehung zwischen der Laufzeit  $t$  des Planeten und der exzentrischen Anomalie  $E$ :

- Die Fläche  $A_P$  des Sektors APS entsteht aus der der Fläche  $A_Q$  des Sektors AQS durch Verkürzung aller senkrechten Sehen im Verhältnis  $b:a$ .

Also gilt  $A_P = \frac{b}{a} \cdot A_Q$ .

- Der Sektor AQS setzt sich aus dem Dreieck MQS und dem Kreissektor AQM zusammen.

Also gilt für die Fläche

$$A_Q = \frac{1}{2} \cdot e \cdot \overline{QD} + \frac{E}{2\pi} \cdot \pi a^2 = \frac{1}{2} \cdot e \cdot a \cdot \sin E + \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot E = \frac{a^2}{2} \cdot \left( E + \frac{e}{a} \cdot \sin E \right)$$

- Nach dem Flächensatz ist  $A_P$  proportional zur Laufzeit  $t$ , so dass folgt

$$A_P = \frac{b}{a} \cdot A_Q = \frac{a \cdot b}{2} \cdot \left( E + \frac{e}{a} \cdot \sin E \right) = \text{konst.} \cdot t$$

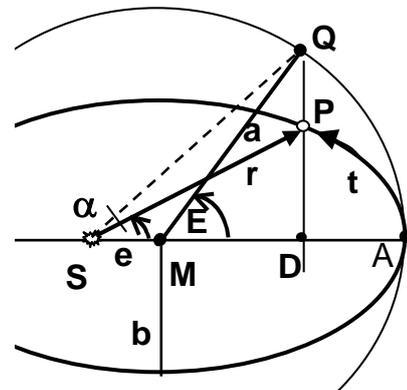
- Für die Umlaufzeit  $t = T$  gilt  $E = 2\pi$  und damit  $\text{konst.} = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{T}$   
(= Flächeninhalt der Ellipse geteilt durch Umlaufzeit).

Die gesuchte Beziehung lautet schließlich

$$E + \frac{e}{a} \cdot \sin E = 2\pi \cdot \frac{t}{T}$$

- Diese für die Ephemeridenrechnung grundlegende Gleichung wird dem Entdecker zu Ehren Keplergleichung genannt.
- Durchläuft ein angenommener Punkt R den Kreis um M mit einer konstanten Geschwindigkeit, so ist der zurückgelegte Zentriwinkel  $\mu = 2\pi \cdot t/T$ , er heißt mittlere Anomalie.
- Die Keplergleichung ist nicht elementar nach  $E$  auflösbar. Dieses berühmte Problem formuliert Kepler mit der Aufforderung an die Mathematiker es zu lösen:

*„Ist jedoch die mittlere Anomalie gegeben, so gibt es keine geometrische Methode, um zur ausgeglichen (=wahren) oder exzentrischen Anomalie zu gelangen. ... Mir genügt die Überzeugung, dass eine Lösung a priori nicht möglich ist wegen der heterogenen Beschaffenheit von Bogen und Sinus. Wer immer ...einen Ausweg nachweist, der sei mir ein großer Mathematiker gleich Apollonius.“* Astronomia nova am Ende von Teil IV



Ermittlung der Keplergleichung mittels Integration:

- Kepler versuchte stets, seine Ergebnisse auf verschiedenen Wegen zu erreichen.

So setze er die Beziehung  $r \cdot v = \text{konst.}$  auch für den Kreispunkt Q an.

Mit  $v = \frac{a \cdot dE}{dt}$  folgt dann (in moderner Form)  $a \cdot r \cdot dE = \text{konst.} \cdot dt$  und

durch Integration  $\text{konst.} \cdot t = a \cdot \int r \, dE$ .

- Kepler setzte mutig die Ellipsengleichung  $r = a + e \cdot \cos E$  ein und erhielt „wie durch ein Wunder“ seine Keplergleichung:

$$\text{konst.} \cdot t = a^2 \cdot \int \left( 1 + \frac{e}{a} \cdot \cos E \right) dE = a^2 \cdot \left( E + \frac{e}{a} \cdot \sin E \right).$$

Für  $t = T$  gilt  $E = 2\pi$  und damit  $\text{konst.} = \frac{2\pi a^2}{T}$  u.s.w.

### Das dritte keplersche Gesetz

Zehn Jahre nach der *Astronomia nova* erscheint die *Harmonices mundi*, ein von der Zahlenmystik und musikalischen Harmonielehre beeinflusstes Werk, in dem Kepler, auf der Suche nach der „Weltharmonik“, das dritte Gesetz mitteilt.

- Schon in seinem Jugendwerk *Mysterium cosmographicum* hatte er spekulativ die Abstände der Planeten ( im kopernikanischen System ! ) nach den platonischen regulären Körpern angeordnet.
- Jetzt konnte er mit den auf alle Planeten verallgemeinerten Ergebnissen aus der *Astronomia nova* den Zusammenhang zwischen Umlaufzeit T und großer Halbachse a der Planetenbahn experimentell ermitteln.  
Mit dem Ansatz

$$T_1^n : T_2^n = a_1^m : a_2^m$$

fand er unter verschiedenen „harmonischen“ Verhältnissen der Exponenten  $n:m = 1:1, 1:2, 2:3, \dots$  das richtige  $2 : 3$ .

*„Was ich vor 22 Jahren geahnt habe ... das habe ich endlich ans Licht gebracht ... obschon nicht ganz so, wie ich anfänglich dachte, sondern (und das ist nicht meine geringste Freude) etwas anders, aber zugleich schöner und vortrefflicher.“*

Harmonices mundi ... Liber V (nach Simonyi)

- Eine physikalische Begründung dieses Gesetzes blieb ihm jedoch verwehrt, weil die Grundbegriff der Dynamik erst entwickelt werden mussten (Galilei → Newton).  
Die keplerschen Gesetze führten aber Newton zum Gravitationsgesetz, aus dem die korrigierte Form des 3. Gesetzes folgt:

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \cdot \frac{M + m_1}{M + m_2}$$

M Sonnenmasse, m Planetenmasse, Mars:  $m/M = 0.0000003$ .

- Ein offenes Problem blieb auch die genaue Ermittlung der wahren Planetenabstände, d.h. der astronomischen Einheit AE.

Planetendaten

	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn
Halbachse a in AE	0.387	0.723	1.000	1.524	5.203	9.539
num. Exzentrizität e/a	0.206	0.007	0.017	0.093	0.048	0.056
siderische. Umlaufzeit T in Jahren	0.241	0.615	1.000	1.880	11.86	29.46
Verhältnis $a^3 : T^2$	0.998	0.999	1.000	1.001	1.001	1.000
Bahnneigung i in Grad	7.0	3.4	0.0	1.8	1.3	2.5

### **Subjektive und objektive Faktoren des Erfolgs**

1. Kepler war auf der Höhe des mathematischen Wissens seiner Zeit.
2. Kepler war ein unermüdlicher Rechner, der sich von Fehlschlägen nicht entmutigen ließ. Er nutzte alle neuen Rechenhilfsmittel.  
Zum Beispiel: Aufstellung eigener Logarithmentafeln (nach Nepers Vorlage) für die Rudolphinischen Tafeln.
3. Kepler ließ sich weder durch persönliche Schicksale, finanzielle Probleme, politische Wirren, religiöse Bevormundung oder auch Ablehnung durch die Zeitgefährten im Forscherdrang beirren.
4. Es gab ein Bedürfnis nach genaueren Ephemeriden als den mittels der Alphonsinischen u.a. Tafeln berechneten.  
(Astrologie, Kalender, Schifffahrt, Auftrag Kaiser Rudolfs).
5. Kepler stand das umfangreichste, genaueste Beobachtungsmaterial seiner Zeit zur Verfügung (Tycho Brahe).
6. Kepler war Anhänger des kopernikanischen Weltsystems. Der Tod Brahes befreite ihn von dessen Wunsch, das Brahesche System zu verwenden.
7. Die Erdbahn ist einer Kreisbahn sehr ähnlich, was die Entdeckung des 2. Gesetzes förderte. Die Marsbahn hat eine hohe Exzentrizität, so dass eine Beschreibung mittels Kreisbewegungen nicht mehr genau genug war.
8. Für Kepler hatten die Beobachtungsergebnisse Vorrang vor den überkommenen Vorstellungen und Vorurteilen (Dogmen). Er suchte in den Beobachtungen stets die zugrunde liegenden Gesetze. Dies macht ihn mit Galilei zu Wegbereitern der Naturwissenschaft.
9. Kepler sah in der Sonne die Ursache der Planetenbewegung. Dies ist der Schritt von der Methaphysik zur Physik des Himmels.
10. Kepler glaubte fest an eine göttliche Harmonie der Bewegungen am Himmel und war überzeugt, diese in den drei Gesetzen gefunden zu haben. Er ertrug die fehlende Anerkennung mit stolzer Gleichmut:

***„Ich kann 100 Jahre auf den Leser warten, hat doch der Herrgott 6000 Jahre auf den Entdecker seines Werkes warten müssen .“***

Harmonices mundi , Liber V (freie Übersetzung nach W. Gerlach)

### Literatur

- J. Kepler (Hrg. Caspar) Neue Astronomie 1990
- K. Simonyi Kulturgeschichte der Physik 1990
- E.J. Dijksterhuis Die Mechanisierung des Weltbildes 2002
- A.M. Lombardi Johannes Kepler Spektrum-Biographie 4/2000
- W. Shea Nikolaus Kopernikus Spektrum-B. 1/2003
  
- J. Hoppe Johannes Kepler (Biographie) 1976
- W. Gerlach Johannes Kepler und die Copernikanische Wende (Leopoldina-Vortrag) 1987
- H. Wußing/ W.Arnold Biographien bedeutender Mathematiker 1975
- R. Wahsner Mensch und Kosmos Die copernikanische Wende 1978
  
- H. Zimmermann/Weigert ABC Astronomie 1995
- A. Guthmann Einführung in die Himmelsmechanik und Ephemeridenberechnung 2000
  
- J. Tralow Kepler und der Kaiser (Roman) 1984
- R. Schuder Der Sohn der Hexe In der Mühle des Teufels (Romane) 1972

### Internet-Adressen

Keplergymnasium Weiden: [www.kepler-weiden.de/html/kepler/leben.html](http://www.kepler-weiden.de/html/kepler/leben.html)

Kepler-Gesetze: [//abenteuer-universum.vol4u.de/kepler.html](http://abenteuer-universum.vol4u.de/kepler.html)

1X1 Astrophysik: [www.avgoe.de/astro/Teil04/Kepler.html](http://www.avgoe.de/astro/Teil04/Kepler.html)

Physikalische Referate Westfalen-Kolleg (Animation d. Planetenbewegung):

[www.muenster.de/~breitens/referate/kepler/phys/kepler.htm](http://www.muenster.de/~breitens/referate/kepler/phys/kepler.htm)

Keplermuseum Graz: [www.brgkepler.at/projekte/keplerraum/](http://www.brgkepler.at/projekte/keplerraum/)

Freenet-Diskussionsportal (Wie fand Kepler die Gesetze?):

[//freenet.meome.de/app/fn/artcont\\_portal\\_news\\_article.jsp?catId=65004](http://freenet.meome.de/app/fn/artcont_portal_news_article.jsp?catId=65004)