Astronomische Koordinatensysteme und Ephemeridenrechnung

mit Hilfe der Planetentheorie VSOP87

1. Einleitung

Die Astronomie beschäftigt sich mit vielen Themen und Fragen – von der Entstehung des Universums über Sternentwicklung und Schwarze Löcher bis hin zu Wechselwirkungen zwischen Körpern innerhalb unseres Sonnensystems. Mit dieser Arbeit möchte ich nun einen kurzen Einblick in einen Teilbereich der Astronomie geben – in die Himmelsmechanik. Diese beschreibt Bewegungen von Körpern in unserem Sonnensystem und gibt die Position dieser anhand verschiedener Koordinatensysteme wieder. Im folgenden werden einige Koordinatensysteme und Methoden der Positionsbestimmung beschrieben. Mit Hilfe grafischer Abbildungen werden diese anschaulich gemacht. Der zweite Teil, die Ephemeridenrechnung, beschreibt ein bestimmtes Verfahren (VSOP87) zur Berechnung der Koordinaten der Planeten Merkur bis Neptun. Weiters lässt sich die Datei "Ephem.zip" herunterladen. Mit dem entpackten Programm ist es möglich, die Julianische Tageszahl und die Koordinaten eines Planeten für einen beliebigen Zeitpunkt zu berechnen. Das Programm ermittelt die Koordinaten mit der auf diesen Seiten beschriebenen Methode.

Updated by Johannes on December 30, 2014.

Astronomische Koordinatensysteme und Ephemeridenrechnung

mit Hilfe der Planetentheorie VSOP87

2. Koordinatensysteme

2.1 sphärische und kartesische Darstellung

Um den Ort eines Punktes im Raum zu beschreiben, wird ein Koordinatensystem benötigt, welches durch einen **Nullpunkt**, eine **Bezugsrichtung** und eine **Bezugsebene** festgelegt ist. Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten zur Auffindung eines Punktes in einem solchen Koordinatensystem:

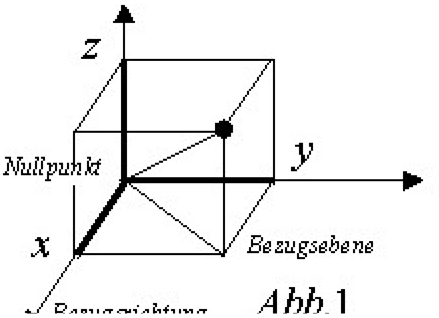
A) Angabe in kartesischen (rechtwinkligen) Koordinaten
B) Angabe in sphärischen Koordinaten (Polarkoordinaten)

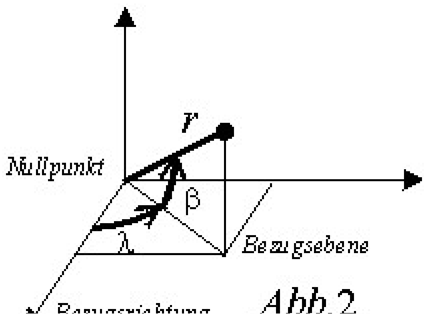
ad A) kartesische (rechtwinklige) Koordinaten: (siehe Abb. 1)

Die Koordinaten eines Punktes werden in der Form (x, y, z) angegeben, welche die Längen der Projektionen des Punktes auf die entsprechenden Achsen wiedergeben.

ad B) sphärische Koordinaten (Polarkoordinaten): (siehe Abb. 2)

Die Koordinaten eines Punktes werden in der Form (λ, β) angegeben, wobei β als Breite bezeichnet wird und den Winkel zwischen der Bezugsebene und der Verbindung Nullpunkt – Punkt angibt. λ wird als Länge bezeichnet und gibt den Winkel zwischen der Projektion der Verbindung Nullpunkt – Punkt auf die Bezugsebene und der Bezugsrichtung an. Der Abstand des Punktes vom Nullpunkt wird als r bezeichnet.





sphärisch – kartesisch	kartesisch – sphärisch
$x = r \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\lambda)$	$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
$y = r \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\lambda)$	$\beta = \arcsin \frac{z}{r}$
$z = r \cdot \sin(\beta)$	$\lambda = \arctan \frac{y}{x}$

Die Winkel sind alle im Gradmaß gemessen und es wird vorausgesetzt, daß sich beide Systeme auf den selben Nullpunkt, die selbe Bezugsrichtung und die selbe Bezugsebene beziehen.

2.2 verwendete Begriffe

Ekliptik: (siehe Abb. 3)

Betrachtet man die Bahn der Erde um die Sonne, so stellt man fest, daß alle Punkte dieser Bahn in einer Ebene liegen, die durch die Mitte der Sonne geht (= **Ekliptik**).

Himmelsäquator: (siehe Abb. 3)

Legt man eine Ebene durch den Erdmittelpunkt, die senkrecht auf der Erdachse steht, schneidet diese die Erdoberfläche im Erdäquator (= **Himmelsäquator)**.

Frühlingspunkt, Herbstpunkt: (siehe Abb. 3)

Legt man eine Ebene durch den Sonnenmittelpunkt, die parallel zur Himmelsäquatorebene liegt, dann schneidet sich diese mit der Ekliptik in einer Gerade, die wieder durch die Sonne geht. Die Richtungen, in die diese Gerade zeigt, bezeichnet man als **Frühlingspunkt** (♈) und **Herbstpunkt** (♎).

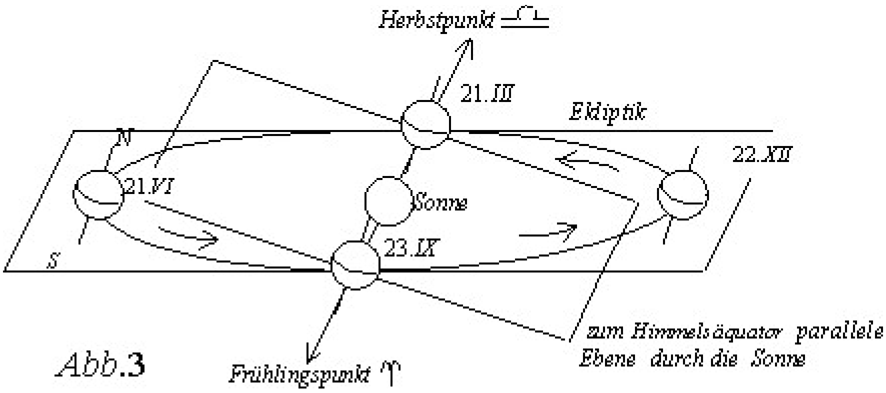


Abb.3

aufsteigender Knoten:

Als **aufsteigender Knoten** wird jener Punkt bezeichnet, in dem ein Planet die Ekliptik von Süden nach Norden – also "aufsteigend" – durchstößt.

Äquinoktium:

Da Himmelsäquator und Ekliptik über lange Zeiträume hinweg, nicht fest im Raum stehen, sondern eine Bewegung durchmachen, welche als **Präzession** bezeichnet wird, muß der Zeitpunkt bekannt sein, auf welchen sich die Angaben der Koordinaten beziehen. So bedeutet etwa "Äquinoktium 2000.0", daß sich die Koordinaten auf die Lage von Himmelsäquator, Ekliptik und Frühlingspunkt des 1. Januars, 12h des Jahres 2000 beziehen.

Präzession:

Die Neigung des Erdäquators gegen die Ekliptik liegt bei ca. 23°27' (Schiefe der Ekliptik). Somit ist der Erdäquatorwulst nicht auf die Sonne ausgerichtet. Folglich übt die Sonne ein Drehmoment auf den Erdäquatorwulst aus, welches die Aufrichtung der Erdachse bewirkt. Außerdem liegt die Mondbahnebene in etwa auf der Ekliptik und so übt auch dieser ein Drehmoment auf den Erdäquatorwulst aus. Da die Erde durch die Rotation um die eigene Achse einen Kreisel darstellt, muß sie den physikalischen Gesetzen zufolge, rechtwinklig ausweichen (= **Präzession**).

Nutation und Schiefe der Ekliptik:

Der Präzession überlagert ist die **Nutation**. Diese entsteht durch den unterschiedlich großen Einfluß des Mondes auf den Erdäquatorwulst. Der Einfluß des Mondes erreicht ein Minimum, wenn der Winkel zwischen der Mondbahnebene und dem Erdäquator am kleinsten ist, und ein Maximum, wenn dieser Winkel am größten ist. Die Nutation verursacht somit eine Änderung in der **Schiefe der Ekliptik** (Neigung der Rotationsachse der Erde = Winkel zwischen Ekliptik und Himmelsäquator).

Lichtlaufzeit und Aberration:

Diese zwei Effekte sind verantwortlich für die scheinbare Ortsveränderung eines Planeten:

- Lichtlaufzeit: der Planet wird dort gesehen, wo er war, als der Lichtstrahl ihn verließ (aufgrund endlicher Geschwindigkeit des Lichts).
- Aberration: durch die Bewegung der Erde um die Sonne (**jährliche Aberration**) und um die eigene Achse (**tägliche Aberration**), verändert sich die Einfallsrichtung des Lichts.

Julianische Tageszahl (Julianischer Tag):

Dies ist eine fortlaufende Zählung von Tagen und deren Bruchteilen vom Beginn des astronomischen Jahres -4712. Das astronomische Jahr -4712 entspricht dem Jahr 4713 v. Chr. (christliche Zeitzählung). Das astronomische Jahr 0 entspricht also dem Jahr 1 v. Chr. In der christlichen Zeitzählung gibt es jedoch das Jahr 0 nicht und es folgt das Jahr 1 n. Chr., welches somit dem astronomischen Jahr 1 entspricht. Folgend ist die Tageszahl der astronomischen Zeitzählung gleich der Tageszahl der christlichen Zeitzählung.

Bis zum 4. Oktober 1582 n. Chr. galt der **Julianische Kalender**, demzufolge in jenen Jahren ein 29. Februar als Schalttag eingeführt wurde, deren astronomische Jahreszahl durch vier teilbar war.

Bis zum Mittag des 4. Oktobers 1582 – zu beachten ist, daß der **Julianische Tag** um 12h Weltzeit (Universal Time UT) beginnt – waren also 2 299 160,0 Julianische Tage vergangen.

Die gregorianische Kalenderreform ließ auf diesen Tag sofort den 15. Oktober 1582 folgen, dessen Beginn somit der Julianischen Tageszahl 2 299 160,5 entspricht. Seit diesem Zeitpunkt ist jedes Jahr ein Schaltjahr, dessen Jahreszahl

- durch vier, aber nicht durch hundert teilbar ist oder
- durch vierhundert teilbar ist.

2.3 Heliozentrisch – ekliptikales Koordinatensystem

- Nullpunkt: Sonne
- Bezugsebene: Ekliptik
- Bezugsrichtung: Frühlingspunkt

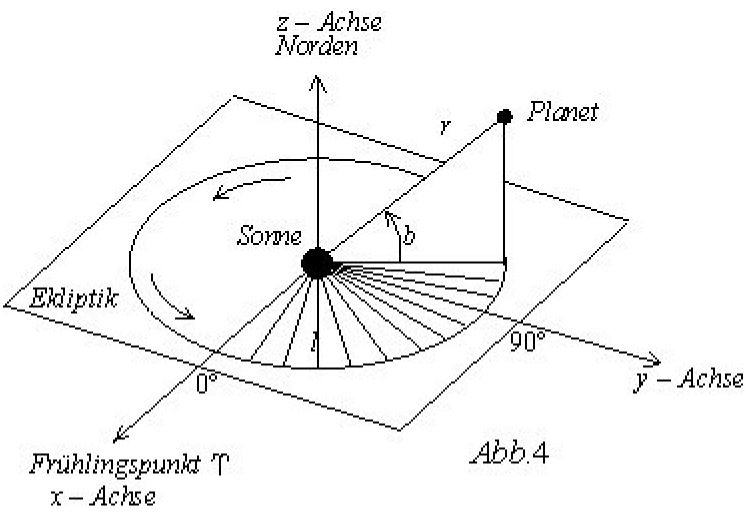


Abb.4

- r: Entfernung von der Sonne

- b: ekliptikale Breite:

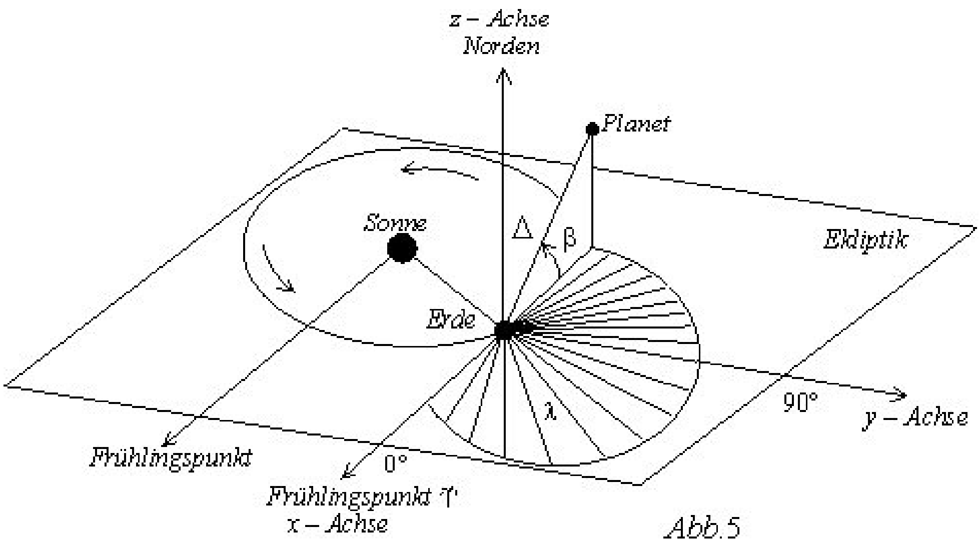
  - Der Winkel zwischen der Linie Sonne – Planet und der Ekliptik. Gemessen wird dieser von der Ekliptik aus gesehen nach **Norden positiv** und nach **Süden negativ**.

- ekliptikale Länge:

  - Der Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und der Projektion der Linie Sonne – Planet auf die Ekliptik. Gemessen wird dieser vom Frühlingspunkt aus gesehen in Richtung der Erdbewegung von 0° bis 360°.

2.4 Geozentrisch – ekliptikales Koordinatensystem

- Nullpunkt: Sonne
- Bezugsebene: Ekliptik
- Bezugsrichtung: Frühlingspunkt



- Δ:Entfernung von der Erde
- β:ekliptikale Breite:

  - Der Winkel zwischen der Linie Erde – Planet und der Ekliptik. Gemessen wird dieser von der Ekliptik aus gesehen nach **Norden positiv** und nach **Süden negativ**.

- λ:ekliptikale Länge:

- Der Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und der Projektion der Linie Erde – Planet auf die Ekliptik. Gemessen wird dieser vom Frühlingspunkt aus gesehen in Richtung der Erdbewegung von 0° bis 360°.

2.5 Geozentrisch – äquatoriales Koordinatensystem

- Nullpunkt: Erdmittelpunkt
- Bezugsebene: Himmelsäquator
- Bezugsrichtung: Frühlingspunkt

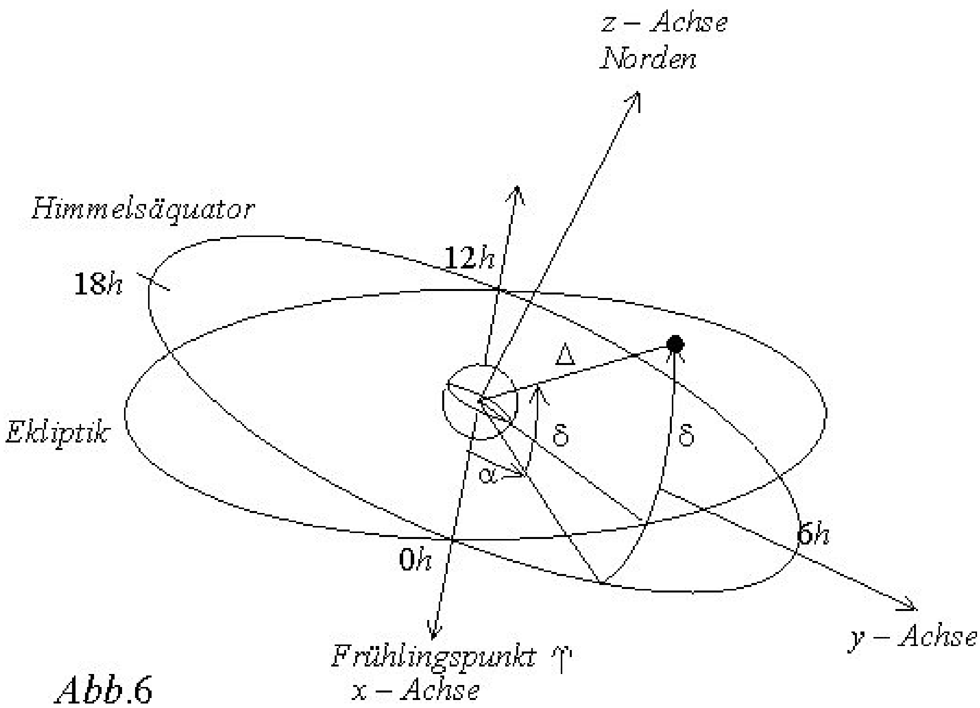


Abb.6

- Δ:Entfernung von der Erde
- δ:Deklination:

  - Der Winkel zwischen der Linie Erde – Planet und dem Himmelsäquator. Gemessen wird dieser vom Himmelsäquator aus gesehen nach **Norden positiv** und nach **Süden negativ**.

- α :Rektaszension:

  - Der Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und der Projektion der Linie Erde – Planet auf den Himmelsäquator. Gemessen wird dieser vom Frühlingspunkt aus gesehen in Richtung der Erdbewegung von 0h bis 24h.

Updated by Johannes on December 30, 2014.

3. Ephemeridenrechnung

3.1 Allgemeines

Zur Ephemeridenrechnung sind folgende Schritte nötig:

- Umwandlung des gewünschten Datums des Julianischen Kalenders in die entsprechende Julianische Tageszahl
- Berechnen der heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten mit Hilfe der VSOP87 – Theorie
- Transformation zu geozentrischen ekliptikalen Koordinaten (geometrische Position)
- Transformation zu geozentrischen äquatorialen Koordinaten (scheinbare Position)

3.2 Umwandlung eines Datums des Julianischen Kalenders in die Julianische Tageszahl

JD: Julianischer Tag
Y: Jahr
M: Monat
D: Tag
UT: Weltzeit (Universal Time UT)

Vorerst müssen einige Hilfsgrößen (y, m, B) berechnet werden:

$y = Y - 1$	UND	$m = M + 12$	**falls M $\leq$ 2**
$y = Y$	UND	$m = M$	**falls M > 2**

$B = -2$	**bis einschließlich 04.10.1582**

$B = \mathrm{int}(\frac{y}{400}) - \mathrm{int}(\frac{y}{100})$	**ab einschließlich 15.10.1582**

Die Formel zur Bestimmung des Julianischen Tages lautet:

$$JD = \mathrm{int}(365{,}25 \cdot y) + \mathrm{int}(30{,}6001 \cdot (m+1)) + B + 1720996{,}5 + D + \frac{UT}{24}$$

Beispiel: 29. 11. 1998, 0h

$y = 1998$	$m = 11$	$B = \mathrm{int}(\frac{1998}{400}) - \mathrm{int}(\frac{1998}{100}) = 4 - 19 = -15$

$$JD = \mathrm{int}(365{,}25 \cdot 1998) + \mathrm{int}(30{,}6001 \cdot (11+1)) - 15 + 1720996{,}5 + 29 + \frac{0}{24}$$

$$JD = 729769 + 367 - 15 + 1720996{,}5 + 29 = 2451146{,}5$$

Beispiel: 23. 02. 1893, 0h

$y = 1892$	$m = 14$	$B = \mathrm{int}(\frac{1892}{400}) - \mathrm{int}(\frac{1892}{100}) = 4 - 18 = -14$

$$JD = \mathrm{int}(365{,}25 \cdot 1892) + \mathrm{int}(30{,}6001 \cdot (14+1)) - 14 + 1720996{,}5 + 23 + \frac{0}{24}$$

$$JD = 691053 + 459 - 14 + 1720996{,}5 + 23 = 2412517{,}5$$

Beispiel: 07. 10. 1312, 0h

$y = 1892 \; m = 10 \; B = -2$

$$JD = \mathrm{int}(365{,}25 \cdot 1312) + \mathrm{int}(30{,}6001 \cdot (10+1)) - 2 + 1720996{,}5 + 7 + \frac{0}{24}$$

$$JD = 479208 + 336 - 2 + 1720996{,}5 + 7 = 2200545{,}5$$

3.3 Berechnung der heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten mit Hilfe der VSOP87

P. Bretagnon und **Francou** veröffentlichten 1987 die Planetentheorie VSOP87 zur direkten Berechnung der **heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten**. Die VSOP87 ("Variations Séculaires des Orbites Planétaires") besteht aus langen Reihen periodischer Terme für die Planeten Merkur bis Neptun.

Im Anhang lassen sich die Reihen für Venus und Erde wiederfinden, wobei die Terme gekürzt wurden. Somit ergeben sich Ungenauigkeiten in den berechneten Koordinaten, welche jedoch unbedeutend klein sind. Hat man jedoch die gesamte Theorie zur Hand, kann das im weiteren beschriebene Schema zur Berechnung der Koordinaten genauso angewandt werden. Die VSOP87 liefert also:

l: heliozentrische ekliptikale Länge
b: heliozentrische ekliptikale Breite
r: Entfernung von der Sonne

Die Reihen für jeden einzelnen Planeten sind unterteilt: (siehe Anhang)

- Reihen unter der Bezeichnung L0, L1, L2, ... werden zur Berechnung der heliozentrischen ekliptikalen Länge gebraucht.
- Reihen unter der Bezeichnung B0, B1, B2, ... werden zur Berechnung der heliozentrischen ekliptikalen Breite gebraucht.
- Reihen unter der Bezeichnung R0, R1, R2, ... werden zur Berechnung des Sonnenabstands gebraucht.

Jede Reihe besteht aus einzelnen Termen: (siehe Anhang)

Unter einem Term versteht man 3 Zahlen (A, B, C), welche horizontal angelegt sind, und der Wert eines einzigen Terms ist folgendermaßen definiert:

$$A \cdot \cos(B + C \cdot \tau)$$

wobei:

- τ : Dies ist die Zeit, welche in Julianischen Jahrtausenden von der Standardepoche J2000 (1. Januar 2000 12h; in Julianischen Tagen: 2451545,0) ausgehend, angegeben wird.
  $$\tau = \frac{JD - 2451545{,}0}{365250}$$
- A: Dies sind Koeffizienten, die in Einheiten von 10^{-8} rad bei ekliptikaler Länge und Breite gegeben sind. Bei der Entfernung r (Sonne – Erde) sind diese Koeffizienten in 10^{-8} AE gegeben.
- B, C: Größen, die im **Bogenmaß** angegeben sind.

Um die heliozentrische ekliptikale Länge, Breite und die Entfernung Sonne – Erde zu erhalten, geht man folgendermaßen vor:

Man berechne die Summe der Werte jedes einzelnen Terms von Reihe L0, die Summe der Werte jedes einzelnen Terms von Reihe L1 usw. Dann ist die gesuchte heliozentrische ekliptikale Länge in **Bogenmaß** gegeben durch:

$$l = \frac{(L0 + L1 \cdot \tau + L2 \cdot \tau^2 + L3 \cdot \tau^3 + L4 \cdot \tau^4 + L5 \cdot \tau^5)}{10^8}$$

In der gleichen Weise verfahre man mit den Termen und Reihen für die heliozentrische ekliptikale Breite (B0, B1, B2, ...) und den Termen und Reihen für die Entfernung Sonne – Planet (R0, R1, R2, ...).

<u>Beispiel: heliozentrische ekliptikale Koordinaten für Venus am 20. 12. 1992, 0h</u>

$$JD = 2448976{,}5$$

$$\tau = \frac{2448976{,}5 - 2451545{,}0}{365250} = -0{,}007032169747$$

<u>z. B.: Summe der Reihe L2:</u>

Wert des 1. Terms der Reihe L2:	+54127,00000000000000000000000000000
Wert des 2. Terms der Reihe L2:	-2765,68914432686125597362190306098
Wert des 3. Terms der Reihe L2:	-1295,95811507646894393548388015404
Wert des 4. Terms der Reihe L2:	-6,96070676738931515453944825754
Wert des 5. Terms der Reihe L2:	-2,51593284332098056645989120796
Wert des 6. Terms der Reihe L2:	+0,87097547092903710795233000817
Wert des 7. Terms der Reihe L2:	-6,92415079707988424352932014731
Wert des 8. Terms der Reihe L2:	+5,64379188984989445657219331589
SUMME L2:	+50055,46671754965855169089008049730

Dies auf alle anderen Reihen (L0, L1, L3, L4, L5) der Venus angewandt, ergibt:

L0 = +316402122	L3 = -56
L1 = +1021353038718	L4 = -109
L2 = +50055	L5 = -1

$$l = \frac{(316402122 + 1021353038718 \cdot \tau + 50055 \cdot \tau^2 - 56 \cdot \tau^3 - 109 \cdot \tau^4 - 1 \cdot \tau^5)}{10^8}$$

$l = -68{,}6592582$ rad = -3933°,88572 = +26°,11428

Somit betrug die heliozentrische ekliptikale Länge der Venus am 20. 12. 1992, 0h +26°,11428.

In der gleichen Weise verfahre man mit den Termen und Reihen für die heliozentrische ekliptikale Breite (B0, B1, B2, ...) und den Termen und Reihen für die Entfernung Sonne – Planet (R0, R1, R2, ...). Dadurch ergeben sich folgende Werte:

b = -0,0457399 rad = -2°,62070	r = 0,724603 AE

3.4. Transformation zu geozentrischen ekliptikalen Koordinaten (geometrische Position)

Um die heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten (l, b, r) eines Planeten in die geozentrischen ekliptikalen Koordinaten (x, y, z) transformieren zu können, müssen vorerst die heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten der Erde (l_0, b_0, r_0) mit der in Kapitel 3.3. beschriebenen Methode errechnet werden.

Sind diese schließlich bekannt, kann die Transformation der heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten – sphärische Darstellung – in geozentrische ekliptikale Koordinaten – kartesische Darstellung durchgeführt werden: (siehe Kapitel 2.1.)

$$x = r\cos b\cos l - r_0\cos b_0\cos l_0$$

$$y = r\cos b\sin l - r_0\cos b_0\sin l_0$$

$$z = r\sin b - r_0\sin b_0$$

Die so ermittelten geozentrischen ekliptikalen Koordinaten in kartesischer Darstellung (x, y, z) lassen sich nun in die sphärische Darstellung (λ, β, Δ) transformieren. (siehe Kapitel 2.1.)

$$\Delta = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\tan \beta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\tan \lambda = \frac{y}{x}$$

<u>Beispiel: geozentrische ekliptikale Koordinaten für Venus am 20. 12. 1992, 0h</u>

Die zuvor schon berechneten heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten der Venus lauten:

l: +26°,11428	b: -2°,62070	r: 0,724603 AE

Es ergeben sich für die heliozentrischen ekliptikalen Koordinaten für die Erde am 20. 12. 1992, 0h:

$l_0 = +88°,35704$	$b_0 = +0°,00014$	$r_0 = 0{,}983824$ AE

Die Transformation zu geozentrischen ekliptikalen Koordinaten (kartesisch) ergibt:

$$x = 0{,}724603 \cdot \cos(-2{,}62070) \cdot \cos(26{,}11428) - 0{,}983824 \cdot \cos(0{,}00014) \cdot \cos(88{,}35704)$$

$$y = 0{,}724603 \cdot \cos(-2{,}62070) \cdot \sin(26{,}11428) - 0{,}983824 \cdot \cos(0{,}00014) \cdot \sin(88{,}35704)$$

$$z = 0{,}724603 \cdot \sin(-2{,}62070) - 0{,}983824 \cdot \sin(0{,}00014)$$

Die geozentrischen ekliptikalen Koordinaten (kartesisch dargestellt) für die Venus am 20. 12. 1992, 0h waren also:

$$x = 0{,}6217461689$$

$$y = -0{,}6648097148$$

$$z = -0{,}0331340764$$

Die geozentrischen ekliptikalen Koordinaten in sphärischer Darstellung sind danach:

$$\Delta = \sqrt{0{,}621746^2 + 0{,}66481^2 + 0{,}033129^2}$$

$\Delta = 0{,}910844555$ AE

$$\tan \lambda = \frac{-0{,}66481}{0{,}621746}$$

$$\lambda = -46°{,}91708623$$

$$360° - 46°{,}91708623 = 313°{,}0829138$$

$$\tan \beta = \frac{-0{,}033129}{\sqrt{0{,}621746^2 + 0{,}66481^2}}$$

$$\beta = -2°{,}084725945$$

3.5 Transformation zu geozentrischen äquatorialen Koordinaten (scheinbare Position)

Zur Berechnung der geozentrischen äquatorialen Koordinaten, muß vorerst die Schiefe der Ekliptik (Neigung der Rotationsachse der Erde = Winkel zwischen Ekliptik und Himmelsäquator) zum gewünschten Zeitpunkt τ bekannt sein, wobei τ diesmal in Julianischen Jahrhunderten von der Standardepoche J2000,0 (1. Januar 2000, 12h; in Julianischen Tagen: 2451545,0) gemessen, angeben werden muß. Somit gilt für τ :

$$\tau = \frac{JD - 2451545{,}0}{36525}$$

Die mittlere Schiefe der Ekliptik (durch Internationale Astronomische Union festgelegt) zum Zeitpunkt τ durch:

$$\varepsilon_0 = 23°26'21''{,}448 - 46''{,}8150 \cdot \tau - 0''{,}00059 \cdot \tau^2 + 0''{,}001813 \cdot \tau^3$$

$$\varepsilon_0 = 23°{,}439291 - 0°{,}013004167 \cdot \tau - 0°{,}000000164 \cdot \tau^2 + 0°{,}000000504 \cdot \tau^3$$

Die geozentrischen äquatorialen Koordinaten sind nun folgendermaßen gegeben:

$$\tan \alpha = \frac{\sin \lambda \cos \varepsilon - \tan \beta \sin \varepsilon}{\cos \lambda}$$

$$\sin \delta = \sin \beta \cos \varepsilon + \cos \beta \sin \varepsilon \sin \lambda$$

<u>Beispiel: geozentrische äquatoriale Koordinaten für Venus am 20. 12. 1992, 0h</u>

$$JD = 2448976{,}5$$

$$\tau = \frac{2448976{,}5 - 2451545{,}0}{36525} = -0{,}07032169746748802190$$

$$\varepsilon_0 = 23°{,}439291 - 0°{,}013004167 \cdot \tau - 0°{,}000000164 \cdot \tau^2 + 0°{,}000000504 \cdot \tau^3$$

$\varepsilon_0 = 23°,44020547411$

Die zuvor schon berechneten geozentrischen ekliptikalen Koordinaten für die Venus am 20. 12. 1992, 0h lauten:

$\lambda = 313°,0829138$	$\beta = -2°,084725945$

Die geozentrischen äquatorialen Koordinaten für die Venus am 20. 12. 1992, 0h waren also:

$$\tan \alpha = \frac{\sin(313{,}0829138) \cdot \cos(23{,}44020547411) - \tan(-2{,}084725945) \cdot \sin(23{,}44020547411)}{\cos(313{,}0829138)}$$

$$\alpha = -43°,82558408$$

$$360° - 43°,82558408 = 316°,1744159$$

$$21h04m41s$$

$$\sin \delta =$$
$$\sin(2{,}084725945) \cdot \cos(23{,}44020547411) +$$
$$+ \cos(2{,}084725945) \cdot \sin(23{,}44020547411) \cdot \sin(313{,}0829138)$$

$$\delta = -18°,88783877$$

$$-18°53'16''$$

3.6 Genauigkeit der Ergebnisse:

Falls das in meiner Arbeit beschriebene Schema zur Ephemeridenrechnung mit der gesamten Planetentheorie VSOP87 angewandt wird, ergeben sich Abweichungen durch folgende Effekte: (siehe Kapitel 2.2.)

- Nutation und Schiefe der Ekliptik
- Lichtlaufzeit und Aberration

Nutation und Schiefe der Ekliptik:

In meiner Arbeit beziehen sich die Koordinaten auf die **mittlere Schiefe der Ekliptik**, welche von der Internationalen Astronomischen Union festgelegt wurde. Der Fehler in der mittleren Schiefe der Ekliptik ε_0 gegenüber der wahren Schiefe der Ekliptik erreicht über einen Zeitraum von 2000 Jahren $1''$ und über einen Zeitraum von 4000 Jahren $10''$.

Lichtlaufzeit und Aberration:

Die Abweichung zwischen scheinbarer und wahrer Richtung zu einem Planeten bedingt durch die jährliche Aberration ist sehr gering, denn die

Erdgeschwindigkeit (ca. 30 km/s) ist sehr klein gegen die Lichtgeschwindigkeit c (ca. 300 000 km/s).

Die Abweichung zwischen scheinbarer und wahrer Richtung zu einem Planeten bedingt durch die tägliche Aberration ist abhängig von der Position des Beobachters auf der Erde (abhängig von der geographischen Breite φ). Für einen Beobachter an einem der Pole fällt die Abweichung weg (0° Abweichung). Am Äquator jedoch ist sie am größten ($0{,}32''$), denn für die tägliche Aberration gilt:

$$0{,}32'' \cdot \cos \varphi$$

Updated by Johannes on December 30, 2014.

4. Anhang

4.1 Periodische Terme der Venus und der Erde

VENUS	L0	1	317 614 667	0	0
		2	1 353 968	5.593 133 2	10 213.285 546 2
		3	89 892	5.306 50	20 426.571 09
		4	5 477	4.416 3	7 860.419 4
		5	3 456	2.699 6	11 790.629 1
		6	2 372	2.993 8	3 930.209 7
		7	1 664	4.250 2	1 577.343 5
		8	1 438	4.157 5	9 683.594 6
		9	1 317	5.186 7	26.298 3
		10	1 201	6.153 6	30 639.856 6
		11	769	0.816	9 437.763
		12	761	1.950	529.691
		13	708	1.065	775.523
		14	585	3.998	191.448
		15	500	4.123	15 720.839
		16	429	3.586	19 367.189
		17	327	5.677	5 507.553
		18	326	4.591	10 404.734
		19	232	3.163	9 153.904
		20	180	4.653	1 109.379
		21	155	5.570	19 651.048
		22	128	4.226	20.775
		23	128	0.962	5 661.332
		24	106	1.537	801.821
VENUS	L1	1	1021 352 943 053	0	0
		2	95 708	2.464 24	10 213.285 55
		3	14 445	0.516 25	20 426.571 09
		4	213	1.795	30 639.857
		5	174	2.655	26.298
		6	152	6.106	1 577.344
		7	82	5.70	191.45
		8	70	2.68	9 437.76
		9	52	3.60	775.52
		10	38	1.03	529.69
		11	30	1.25	5 507.55
		12	25	6.11	10 404.73
VENUS	L2	1	54 127	0	0
		2	3 891	0.345 1	10 213.285 5
		3	1 338	2.020 1	20 426.571 1
		4	24	2.05	26.30
		5	19	3.54	30 639.86
		6	10	3.97	775.52
		7	7	1.52	1 577.34
		8	6	1.00	191.45
VENUS	L3	1	136	4.804	10 213.286
		2	78	3.67	20 426.57

		3	26	0	0
VENUS	L4	1	114	3.141 6	0
		2	3	5.21	20 426.57
		3	2	2.51	10 213.29
VENUS	L5	1	1	3.14	0
VENUS	B0	1	5 923 638	0.267 027 8	10 213.285 546 2
		2	40 108	1.147 37	20 426.571 09
		3	32 815	3.141 59	0
		4	1 011	1.089 5	30 639.856 6
		5	149	6.254	18 073.705
		6	138	0.860	1 577.344
		7	130	3.672	9 437.763
		8	120	3.705	2 352.866
		9	108	4.539	22 003.915
VENUS	B1	1	513 348	1.803 643	10 213.285 546
		2	4 380	3.386 2	20 426.571 1
		3	199	0	0
		4	197	2.530	30 639.857
VENUS	B2	1	22 378	3.385 09	10 213.285 55
		2	282	0	0
		3	173	5.256	20 426.571
		4	27	3.87	30 639.86
VENUS	B3	1	647	4.992	10 213.286
		2	20	3.14	0
		3	6	0.77	20 426.57
		4	3	5.44	30 639.86
VENUS	B4	1	14	0.32	10 213.29
VENUS	R0	1	72 334 821	0	0
		2	489 824	4.021 518	10 213.285 546
		3	1 658	4.902 1	20 426.571 1
		4	1 632	2.845 5	7 860.419 4
		5	1 378	1.128 5	11 790.629 1
		6	498	2.587	9 683.595
		7	374	1.423	3 930.210
		8	264	5.529	9 437.763
		9	237	2.551	15 720.839
		10	222	2.013	19 367.189
		11	126	2.728	1 577.344
		12	119	3.020	10 404.734
VENUS	R1	1	34 551	0.891 99	10 213.285 55
		2	234	1.772	20 426.571
		3	234	3.142	0
VENUS	R2	1	1 407	5.063 7	10 213.285 5
		2	16	5.47	20 426.57
		3	13	0	0
VENUS	R3	1	50	3.22	10 213.29
VENUS	R4	1	1	0.92	10 213.29
ERDE	L0	1	175 347 046	0	0
		2	3 341 656	4.669 256 8	6 283.075 850 0
		3	34 894	4.626 10	12 566.151 70
		4	3 497	2.744 1	5 753.384 9
		5	3 418	2.828 9	3.523 1
		6	3 136	3.627 7	77 713.771 5
		7	2 676	4.418 1	7 860.419 4
		8	2 343	6.135 2	3 930.209 7
		9	1 324	0.742 5	11 506.769 8
		10	1 273	2.037 1	529.691 0
		11	1 199	1.109 6	1 577.343 5
		12	990	5.233	5 884.927
		13	902	2.045	26.298
		14	857	3.508	398.149
		15	780	1.179	5 223.694
		16	753	2.533	5 507.553
		17	505	4.583	18 849.228
		18	492	4.205	775.523
		19	357	2.920	0.067

		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
		20	317	5.849	11 790.629
		21	284	1.899	796.298
		22	271	0.315	10 977.079
		23	243	0.345	5 486.778
		24	206	4.806	2 544.314
		25	205	1.869	5 573.143
		26	202	2.458	6 069.777
		27	156	0.833	213.299
		28	132	3.411	2 942.463
		29	126	1.083	20.775
		30	115	0.645	0.980
		31	103	0.636	4 694.003
		32	102	0.976	15 720.839
		33	102	4.267	7.114
		34	99	6.21	2 146.17
		35	98	0.68	155.42
		36	86	5.98	161 000.69
		37	85	1.30	6 275.96
		38	85	3.67	71 430.70
		39	80	1.81	17 260.15
		40	79	3.04	12 036.46
		41	75	1.76	5 088.63
		42	74	3.50	3 154.69
		43	74	4.68	801.82
		44	70	0.83	9 437.76
		45	62	3.98	8 827.39
		46	61	1.82	7 084.90
		47	57	2.78	6 286.60
		48	56	4.39	14 143.50
		49	56	3.47	6 279.55
		50	52	0.19	12 139.55
		51	52	1.33	1 748.02
		52	51	0.28	5 856.48
		53	49	0.49	1 194.45
		54	41	5.37	8 429.24
		55	41	2.40	19 651.05
		56	39	6.17	10 447.39
		57	37	6.04	10 213.29
		58	37	2.57	1 059.38
		59	36	1.71	2 352.87
		60	36	1.78	6 812.77
		61	33	0.59	17 789.85
		62	30	0.44	83 996.85
		63	30	2.74	1 349.87
		64	25	3.16	4 690.48
ERDE	L1	1	628 331 966 747	0	0
		2	206 059	2.678 235	6 283.075 850
		3	4 303	2.635 1	12 566.151 7
		4	425	1.590	3.523
		5	119	5.796	26.298
		6	109	2.966	1 577.344
		7	93	2.59	18 849.23
		8	72	1.14	529.69
		9	68	1.87	398.15
		10	67	4.41	5 507.55
		11	59	2.89	5 223.69
		12	56	2.17	155.42
		13	45	0.40	796.30
		14	36	0.47	775.52
		15	29	2.65	7.11
		16	21	5.34	0.98
		17	19	1.85	5 486.78
		18	19	4.97	213.30
		19	17	2.99	6 275.96
		20	16	0.03	2 544.31
		21	16	1.43	2 146.17
		22	15	1.21	10 977.08
		23	12	2.83	1 748.02
		24	12	3.26	5 088.63
		25	12	5.27	1 194.45
		26	12	2.08	4 694.00
		27	11	0.77	553.57
		28	10	1.30	6 286.60
		29	10	4.24	1 349.87
		30	9	2.70	242.73
		31	9	5.64	951.72
		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

		32	8	5.30	2352.87
		33	6	2.65	9437.76
		34	6	4.67	4690.48
ERDE	L2	1	52919	0	0
		2	8720	1.0721	6283.0758
		3	309	0.867	12566.152
		4	27	0.05	3.52
		5	16	5.19	26.30
		6	16	3.68	155.42
		7	10	0.76	18849.23
		8	9	2.06	77713.77
		9	7	0.83	775.52
		10	5	4.66	1577.34
		11	4	1.03	7.11
		12	4	3.44	5573.14
		13	3	5.14	796.30
		14	3	6.05	5507.55
		15	3	1.19	242.73
		16	3	6.12	529.69
		17	3	0.31	398.15
		18	3	2.28	553.57
		19	2	4.38	5223.69
		20	2	3.75	0.98
ERDE	L3	1	289	5.844	6283.076
		2	35	0	0
		3	17	5.49	12566.15
		4	3	5.20	155.42
		5	1	4.72	3.52
		6	1	5.30	18849.23
		7	1	5.97	242.73
ERDE	L4	1	114	3.142	0
		2	8	4.13	6283.08
		3	1	3.84	12566.15
ERDE	L5	1	1	3.14	0
ERDE	B0	1	280	3.199	84334.662
		2	102	5.422	5507.553
		3	80	3.88	5223.69
		4	44	3.70	2352.87
		5	32	4.00	1577.34
ERDE	B1	1	9	3.90	5507.55
		2	6	1.73	5223.69
ERDE	R0	1	100013989	0	0
		2	1670700	3.0984635	6283.0758500
		3	13956	3.05525	12566.15170
		4	3084	5.1985	77713.7715
		5	1628	1.1739	5753.3849
		6	1576	2.8469	7860.4194
		7	925	5.453	11506.770
		8	542	4.564	3930.210
		9	472	3.661	5884.927
		10	346	0.964	5507.553
		11	329	5.900	5223.694
		12	307	0.299	5573.143
		13	243	4.273	11790.629
		14	212	5.847	1577.344
		15	186	5.022	10977.079
		16	175	3.012	18849.228
		17	110	5.055	5486.778
		18	98	0.89	6069.78
		19	86	5.69	15720.84
		20	86	1.27	161000.69
		21	65	0.27	17260.15
		22	63	0.92	529.69
		23	57	2.01	83996.85
		24	56	5.24	71430.70
		25	49	3.25	2544.31
		26	47	2.58	775.52
		27	45	5.54	9437.76
		28	43	6.01	6275.96
		29	39	5.36	4694.00
		30	38	2.39	8827.39
		31	37	0.83	19651.05

		32	37	4.90	12 139.55
		33	36	1.67	12 036.46
		34	35	1.84	2 942.46
		35	33	0.24	7 084.90
		36	32	0.18	5 088.63
		37	32	1.78	398.15
		38	28	1.21	6 286.60
		39	28	1.90	6 279.55
		40	26	4.59	10 447.39
ERDE	R1	1	103 019	1.107 490	6 283.075 850
		2	1 721	1.064 4	12 566.151 7
		3	702	3.142	0
		4	32	1.02	18 849.23
		5	31	2.84	5 507.55
		6	25	1.32	5 223.69
		7	18	1.42	1 577.34
		8	10	5.91	10 977.08
		9	9	1.42	6 275.96
		10	9	0.27	5 486.78
ERDE	R2	1	4 359	5.784 6	6 283.075 8
		2	124	5.579	12 566.152
		3	12	3.14	0
		4	9	3.63	77 713.77
		5	6	1.87	5 573.14
		6	3	5.47	18 849.23
ERDE	R3	1	145	4.273	6 283.076
		2	7	3.92	12 566.15
ERDE	R4	1	4	2.56	6 283.08

Updated by Johannes on December 30, 2014.

Astronomische Koordinatensysteme und Ephemeridenrechnung

mit Hilfe der Planetentheorie VSOP87

5. Bibliographie

- Bretagnon P., Francou G.:
  1988, Astron. Astrophys., 202, 309.

- Guthmann, Andreas:
  Einführung in die Himmelsmechanik und Ephemeridenrechnung. – Mannheim; Leipzig; Wien; Zürich: BI – Wissenschaftsverlag 1994.

- Herrmann, Joachim:
  Atlas zur Astronomie. – München: Deutscher Taschenbuch Verlag 1990.

- Meeus, Jean:
  Astronomische Algorithmen. – Leipzig; Berlin; Heidelberg: Johann Ambrosius Barth 1994.

- Montenbruck, Oliver:
  Grundlagen der Ephemeridenrechnung. In: Sterne und Weltraum. Taschenbuch 10. – München: Verlag Sterne undWeltraum 1992.

Updated by Johannes on December 30, 2014.

1. Einleitung | 2. Koordinatensysteme | 3. Ephemeridenrechnung | 4. Anhang | 5. Bibliographie | 6. Download

6. Download

Ephemeridenrechner

Mit dem Programm ist man in der Lage, die verschiedenen Koordinaten der Planeten Merkus bis Neptun für einen beliebigen Zeitpunkt zu berechnen. Dabei wird die hier beschriebene Methode verwendet.

download ephem.zip (73KB)

Updated by Johannes on December 30, 2014.

1. Einleitung | 2. Koordinatensysteme | 3. Ephemeridenrechnung | 4. Anhang | 5. Bibliographie | 6. Download