



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Astro-Toolbox

Praxis

D. Egger

IAPG / FESG No. 19

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie

München 2004

Astro-Toolbox

Praxis

D. Egger

IAPG / FESG No. 19

München 2004

ISSN 1437-8280

ISBN 3-934205-18-6

Hinweis: Eine PDF-Version dieser Arbeit mit farbigen Abbildungen ist erhältlich unter
<http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~iapg/web/veroeffentlichung/schriftenreihe/schriftenreihe.php>

Adressen:

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie

Technische Universität München

Arcisstrasse 21

D-80290 München

Germany

Telefon: +49-89-289-23190

Telefax: +49-89-289-23178

<http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~iapg/>

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie

Technische Universität München

Arcisstrasse 21

D-80290 München

Germany

Telefon: +49-89-289-23191

Telefax: +49-89-289-23178

<http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~fesg/>

DIETER EGGER

ASTRO-TOOLBOX

PRAXIS

Vorwort

Nach der Theorie folgt nun die Praxis. Nachdem wir die wichtigsten Objekte der Positionsastronomie erkannt und beschrieben haben, wollen wir sie in unsere Modellwelt übertragen.

Dazu sollte für jedes „reale“ Objekt ein Programmobjekt erstellt werden. Einzelne Programmobjekte können wir bereits im Vorhinein zu komplexeren Objekten zusammenfügen um komplexere Aufgaben zu bearbeiten. Wir verlieren zwar dadurch etwas an Flexibilität, gewinnen aber den Vorteil, daß wir uns nicht jedes Mal auf die elementarste Ebene begeben müssen, um bestimmte wiederkehrende Aufgaben zu lösen.

Zu jedem Objekt, das wir dem Benutzer zur Verfügung stellen wollen, verfassen wir ein graphisches Interface, über das Objekteigenschaften festgelegt und Aktionen veranlasst werden können. Außerdem ermöglichen wir den Objekten selbst, über die graphischen Interfaces miteinander zu kommunizieren. Wir verlagern also die Lösung des Problems von der Softwareentwicklung zur späteren Softwareanwendung. Und gewinnen dadurch ein Höchstmaß an Flexibilität.

Nun, die graphischen Interfaces heißen Tools und die Verwaltung der Tools und ihrer Verschaltungen passiert in der Toolbox. Und da es sich um Positionsastronomie handelt, heißt die Toolbox Astro-Toolbox. Um mit ihr vertraut zu werden, finden Sie in diesem Band eine Reihe von Beispielen, die Sie für Ihre Zwecke leicht in mehr oder weniger veränderter Form einsetzen können. Viel Spass dabei.

Bemerkungen bitte an: dieter@astro-toolbox.com

Java-Implementierung: www.Astro-Toolbox.com

Dieter Egger, München, den 02.11.04

Inhalt

Vorwort	3
Inhalt	5
Beispiele zur Astro-Toolbox	7
Allgemeines	7
Zeit und Kalender	11
Festlegen einer Epoche.....	11
Addition/Subtraktion von Zeiten.....	12
Zeitskala.....	14
Sternzeit.....	16
Sonnenzeit.....	17
Beobachter	20
Eingabe von Koordinaten.....	21
Die Orientierung der Erde im Raum	22
Ekliptik.....	23
Orientierung der Rotationsachse.....	26
Orbit	32
Planetenbahn.....	33
Kometenbahn.....	36
Satellitenbahn.....	38
Transformation	41
Translation.....	42
Rotation.....	45
Korrekturen	47
Lichtablenkung wegen der Sonne.....	48
Aberration.....	50
Refraktion.....	52
Zusammenfassung	55
Literatur	57
Index	59

Beispiele zur Astro-Toolbox

Allgemeines

Wenn Sie die Astro-Toolbox bereits installiert haben, so finden Sie im Ordner „models“ eine Reihe von Textdateien, die in lesbarer Form die Beispiele enthalten. Zunächst werden die benötigten Tools aufgelistet, mit ein paar zusätzlichen Informationen zur Kennzeichnung einiger ihrer Eigenschaften. Und dann folgt die Liste der Toolverbindungen. Der dadurch definierte Schaltplan ist geeignet, eine bestimmte Aufgabenstellung zu bewältigen. Doch widmen wir uns zunächst der Erstellung eines Schaltplans.

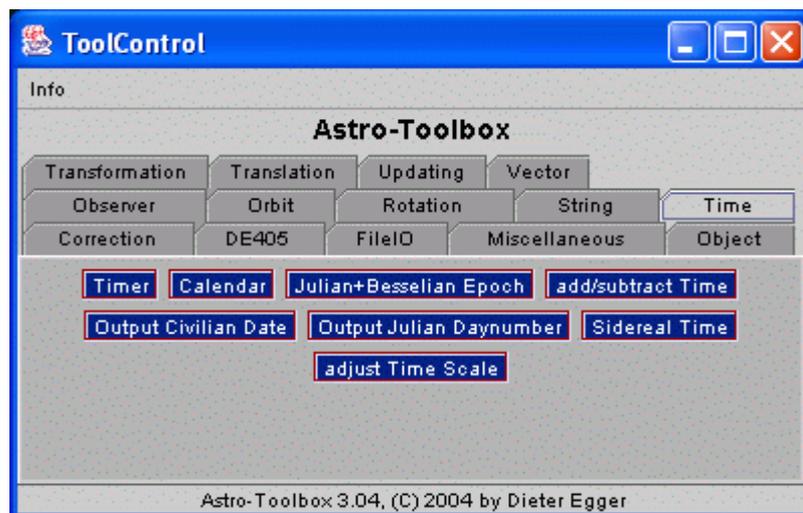


Abbildung 1: Aus den verschiedenen Gruppen der Astro-Toolbox können einzelne Tools durch Anklicken ausgewählt werden. Sie erscheinen dann im ActiveTools Fenster.

Betrachten wir zunächst den sehr einfachen Aufbau einer Digitaluhr. Zu diesem Zweck wählen wir aus der Toolgruppe „Time“ die Tools „Timer“, „Calendar“ und „Output Civilian Date“ aus und ordnen sie im ActiveTools-Fenster wie folgt an:

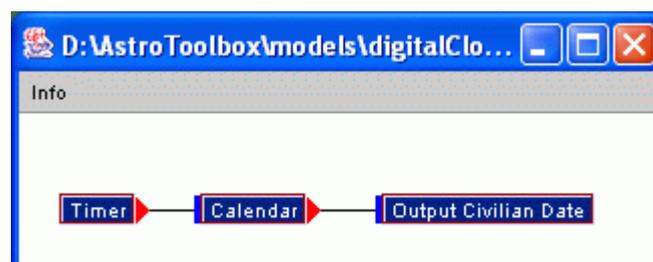


Abbildung 2: Zum Positionieren der Toolbuttons klicken wir bei gedrückter Shift-Taste mit der linken Maustaste auf das Tool und verschieben es bei gedrückter Maustaste an die gewünschte Stelle. Dann klicken wir bei gedrückter Control-Taste auf das „Sender“-Tool und ziehen bei gedrückter linker Maustaste eine Linie zum „Empfänger“-Tool um die Toolverbindung zu definieren.

Zum Lösen der Verbindung ist so zu verfahren wie beim Erstellen der Verbindung, nur daß die ALT-Taste gedrückt wird.

Hier wurde das bereits definierte und abgespeicherte „Model“ digitalClock.txt geladen. Daher erscheint sein Name in der Titelleiste.

Sobald der Schaltplan fertig ist, klicken wir auf die Toolbuttons um die zugehörigen graphischen Interfaces, die Toolfenster, zu öffnen. Ein weiterer Mausklick würde sie wieder schließen und noch ein weiterer wieder öffnen usw.

Wenn wir nun in „Calendar“ auf den Button „UTC“ klicken, wird die aktuelle Computerepoche ausgelesen, nach UTC umgewandelt und an das Tool „Output Civilian Date“ geschickt, das die Information als Zahlen, also digital, anzeigt.

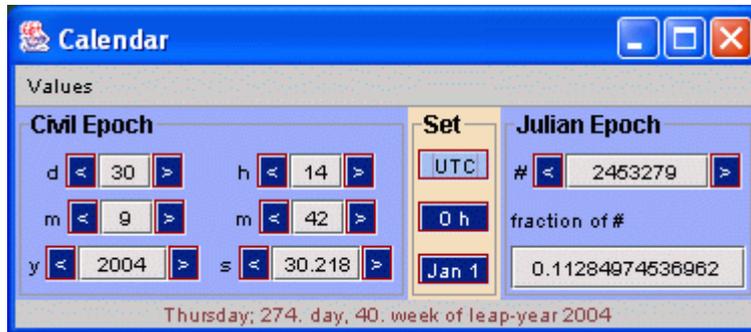


Abbildung 3: In Calendar klicken wir auf UTC, um die aktuelle Computerepoche in UTC einzustellen.



Abbildung 4: Die Zeitanzeige als Datum und Uhrzeit in digitaler Form.

Jedesmal, wenn wir auf „UTC“ klicken, wird die Anzeige in „Output Civilian Date“ erneuert. Damit wir das nicht immer selbst machen müssen, können wir im Tool „Timer“ einstellen, daß pro Sekunde ein Zeitintervall von einer Sekunde an „Calendar“ geschickt wird. Dann wird pro Sekunde eine Sekunde auf die in Calendar gerade angezeigte Zeit aufaddiert und zur endgültigen Anzeige an „Output Civilian Date“ weitergeleitet. Nun ist es aber so, daß „Timer“ nicht wirklich im Sekundentakt vom Betriebssystem (re-)aktiviert wird, sondern je nach Rechnerauslastung, eher stets verspätet. Diesen Nachteil umgehen wir dadurch, daß wir in „Timer“ ein Zeitintervall von 0 (alle Textfelder enthalten Null) vereinbaren.

„Calendar“ wird dann etwa alle Sekunden von „Timer“ ein Zeitintervall von Null erhalten und dann, anstelle das Zeitintervall auf die gerade dargestellte Zeit aufzuaddieren, die Computerzeit neu auslesen. Somit bleibt die Anzeige wenigstens mit der Computeruhr synchronisiert.

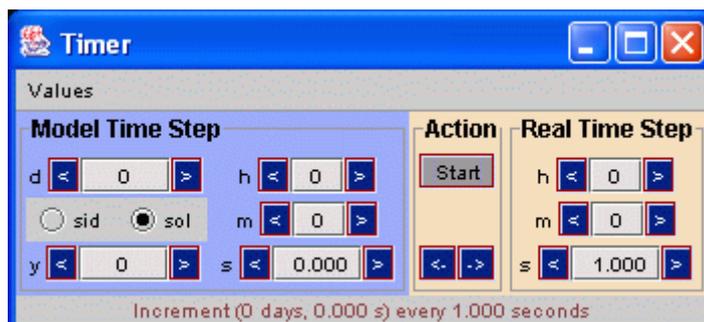


Abbildung 5: Bei einem eingestellten Zeitintervall von Null wird nach dem „Start“ etwa alle Sekunde eine Null an angeschlossene Tools weiter vermittelt. Aber nur „Calendar“ kann etwas Sinnvolles damit anfangen: Es liest jedesmal die Computerzeit neu aus. Andere Tools würden einfach Null aufaddieren und damit praktisch auf der Stelle tappen.

Nachdem unser Lösungsschaltplan steht, speichern wir ihn ab: Ein Klick mit der rechten Maustaste in die weiße Fläche (also nicht auf einen Toolbutton draufklicken; das würde nur das zum Tool gehörige Fenster öffnen und schließen) des ActiveTools-Fensters bringt ein Pop-up-Menü zum Vorschein, in dem wir „Save“ anklicken

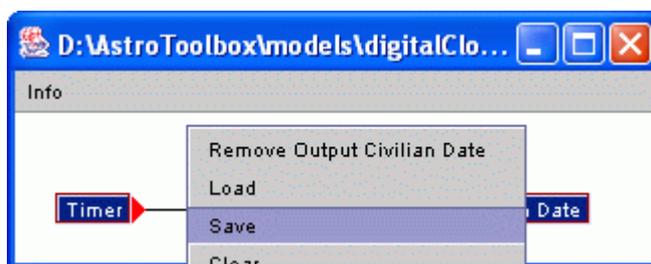


Abbildung 6: Mit einem Klick der rechten Maustaste ins weiße Feld öffnen wir das Pop-up-Menü, in dem wir auf „Save“ klicken.

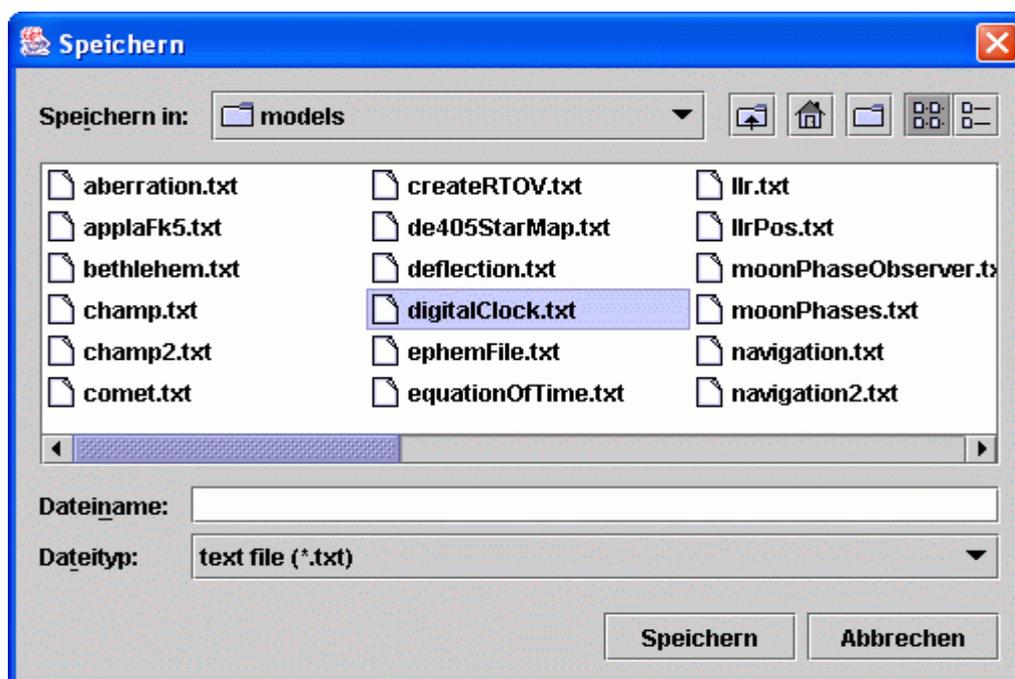


Abbildung 7: Aus der Dateiliste wählen wir das Modell aus, das wir überspeichern wollen, bzw. tragen den Dateinamen ein, wenn es sich um ein neues Lösungs-Modell handelt.

Die daraufhin erscheinende File-Selektor-Box nutzen wir, um den Dateinamen auszuwählen oder neu einzutippen, falls die Datei mit dem Lösungsmodell noch nicht vorhanden ist.

Analog gehen wir vor, wenn wir ein bereits bestehendes Lösungsmodell in die Astro-Toolbox laden wollen, nur daß wir im Popup-Menü den Menüpunkt „Load“ anklicken und dann in der File-Auswahl-Box die zu ladende Datei. Für unser kleines Beispiel heißt sie „digitalClock.txt“ und sieht wie folgt aus:

```
---Tools:
0 "Calendar" 90 40 12 408 1
1 "Output Civilian Date" 180 40 527 204 1
2 "Timer" 20 40 13 98 1 : 0 1 = 0 = 0 = 0 = 0 = 1.000 = 0 = 0 = 1.000
---Connections:
2 "Timer" 0 "Calendar"
0 "Calendar" 1 "Output Civilian Date"
```

Abbildung 8: Die reine Textdatei „digitalClock.txt“, die das Lösungsmodell für die Digitaluhr enthält.

Die Beschreibung des Lösungsmodells beginnt mit der Liste der verwendeten Tools. Jedes Tool wird dabei mit einer laufenden Nummer zur eindeutigen Identifikation versehen. Schließlich kann das selbe Tool auch mehrfach auftreten. Wo der Toolbutton innerhalb des ActiveTools-Fensters zu plazieren ist, tut das erste Zahlenpaar kund, das zweite definiert die Position der linken oberen Ecke des zugehörigen Toolfensters und die fünfte Zahl (0 oder 1) gibt an, ob das Toolfenster gerade sichtbar ist oder nicht. Durch Doppelpunkt getrennt können dann noch weitere Zahlen erscheinen, die beispielsweise aufzeigen, ob Menüpunkte abgehakt sind oder nicht. Und, durch Ist-Gleich-Zeichen getrennt, können weitere Zahlen folgen, die die Inhalte von Textfeldern oder Ähnlichem wiedergeben.

Nach der Tool-Liste folgt die Verbindungsliste, die pro Zeile jeweils eine Verbindung zwischen zwei Tools dokumentiert.

All diese Angaben genügen, um ein erstelltes Lösungsmodell mit den wichtigsten Einstell-daten so abzuspeichern, daß es nach dem Wiederladen, das (vor dem Speichern) zuletzt gewählte Erscheinungsbild reproduzieren kann.

Zeit und Kalender

Festlegen einer Epoche

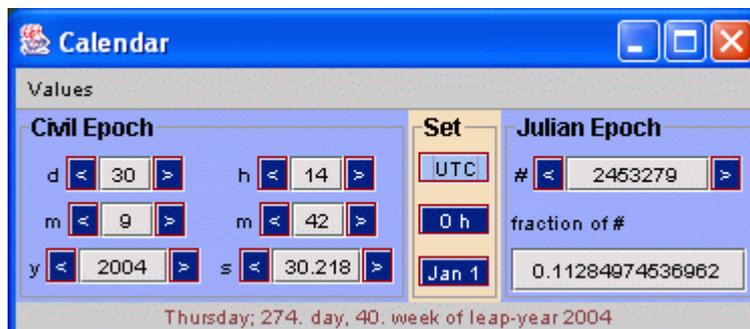


Abbildung 9: Darstellung der Zeit als bürgerliches Datum (links) und als Julianische Tageszahl mit Tagesbruchteil. Intern werden zwei Größen verwendet, eine ganzzahlige für die Tageszahl und eine double-Zahl für den Tagesbruchteil. Damit kann eine Genauigkeit von 10^{11} Sekunden über viele tausend Jahre hinweg realisiert werden. Die Umrechnung in das vertraute bürgerliche Datum befolgt ab dem Jahre 1582 die Schaltjahr-Regel des gregorianischen Kalenders und davor diejenige des julianischen Kalenders.

Alle Ereignisse können durch eine Orts- und eine Zeitangabe eindeutig in das 4-dimensionale Raum-Zeit-Kontinuum eingeordnet werden. Das Tool „Calendar“ aus der Toolgruppe „Time“ übernimmt dabei die Festlegung der Zeit. Für die Sekunden können auch mehr als 3 Stellen nach dem Komma angegeben werden. Sie werden zwar nach dem Drücken der Eingabetaste (Return) nicht mehr angezeigt, aber trotzdem berücksichtigt, wie man am Tagesbruchteil ablesen kann.

Die Buttons „0 h“ und „Jan 1“ sind nur wegen der Bequemlichkeit vorhanden, die Uhrzeit auf Null und den Kalender auf Jahresanfang zu stellen. „UTC“ liest jeweils die aktuelle Computerzeit aus und rechnet sie aufgrund der betriebssysteminternen Zeitzonewahl nach UTC um.

Ein Mausklick auf einen der Buttons oder das Drücken der Return-Taste, wenn der Cursor in einem Textfeld steht, löst die Festlegung der gewählten Epoche aus und übermittelt an angeschlossene Tools ein Ereignis „JulianTime“, woraufhin diese ein Objekt JulianTime (Tageszahl + Tagesbruchteil) abholen können (passiert alles automatisch durch den Verbindungsmechanismus). Die meisten der zeitabhängigen Tools lassen sich somit auf eine gewünschte Epoche festlegen.

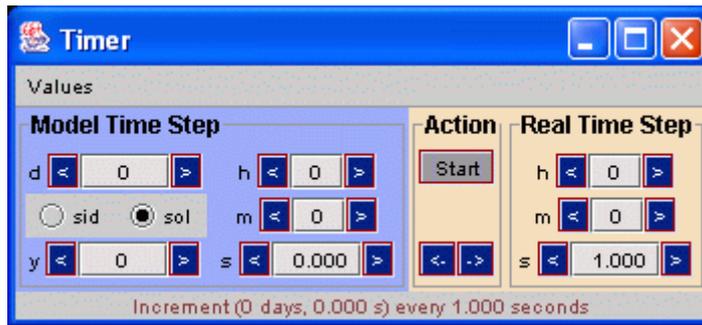


Abbildung 10: Bei einem eingestellten Zeitintervall von Null wird nach dem „Start“ etwa alle Sekunde eine Null an angeschlossene Tools weiter vermittelt. Aber nur „Calendar“ kann etwas Sinnvolles damit anfangen: Es liest jedesmal die Computerzeit neu aus. Bei anderen Tools empfiehlt sich die Wahl eines von Null verschiedenen „Model Time Steps“. Beispielsweise könnten pro „realer“ Sekunde 1000 „Modelljahre“ erzeugt werden um Präzessionseffekte zu veranschaulichen.

Möchte man eine Abfolge von Epochen erzeugen, etwa zur Realisierung einer Animation, so kann man die „<“ und „>“ Buttons entsprechend oft drücken. Oder aber man verknüpft das Tool „Timer“ mit „Calendar“ und drückt auf „Start“. Dann wird pro gewähltem „Real Time Step“ jeweils der eingestellte „Model Time Step“ an die folgenden Tools übermittelt.

Addition/Subtraktion von Zeiten

Möchte man die Anzahl der Tage zwischen zwei Epochen ermitteln, die als bürgerliches Datum vorliegen, so kann man sich leicht den Kopf darüber zerbrechen. Einfacher ist es, wenn die Epochen als Julianische Tageszahlen vorliegen, da nur eine einfache Subtraktion anfällt, um das Ergebnis vorzulegen. Das Tool „Calendar“ beinhaltet stets beide Angaben und erscheint daher für diese Aufgabe gut geeignet. Nimmt man noch das Tool „add/subtract Time“ hinzu, wird die Lösung zum Kinderspiel.

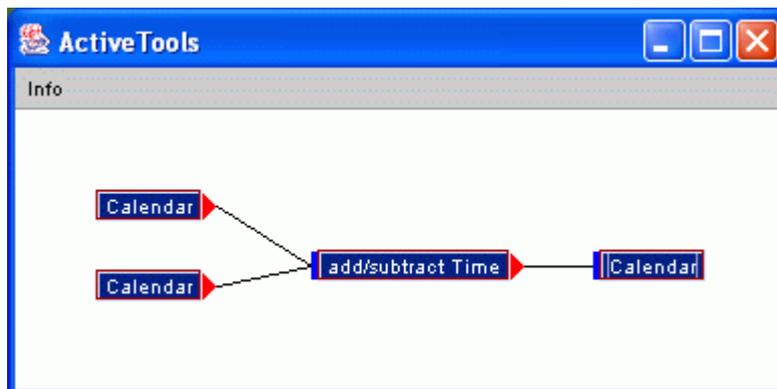


Abbildung 11: Die in den beiden linken Kalendern definierten Tageszahlen werden entweder addiert oder subtrahiert. Im rechten Kalender erscheint dann das Ergebnis.

Nachdem wir den in Abbildung 11 gezeigten Schaltplan erstellt haben, tragen wir in den linken oberen Kalender das „neuere“ Datum ein, also beispielsweise

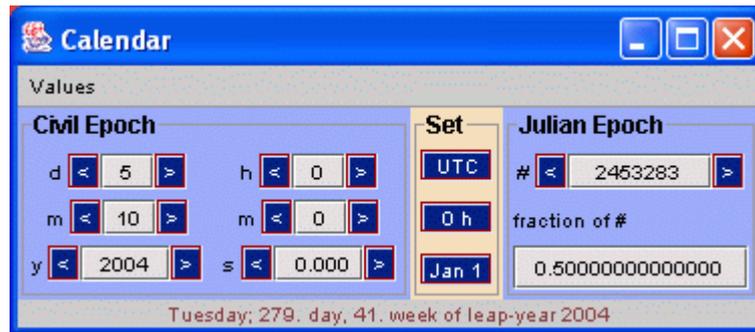


Abbildung 12: Die „jüngere“ Epoche kommt in den Kalender links oben. Nachdem entweder einer der Buttons oder die Return-Taste gedrückt worden ist, wird diese Epoche zum linken Operanden für „add/subtract Time“.

und in den Kalender links unten das „ältere“ Datum, zu dem wir den Abstand in Tagen ermitteln wollen

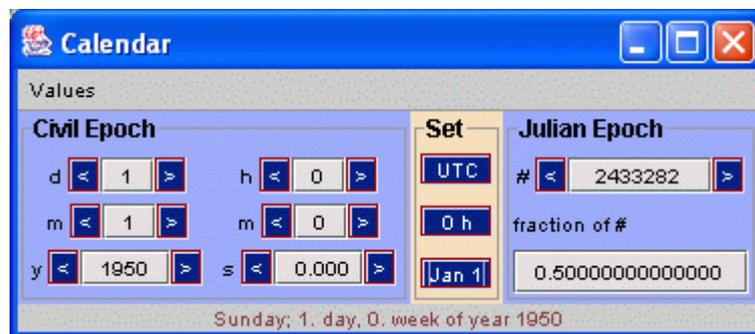


Abbildung 13: Die „ältere“ Epoche kommt in den Kalender links unten. Nachdem entweder einer der Buttons oder die Return-Taste gedrückt worden ist, wird diese Epoche zum rechten Operanden für „add/subtract Time“.

Im Tool „add/subtract Time“ kontrollieren wir, ob die Operation auf „minus“ steht. Wenn nicht, klicken wir auf den entsprechenden Radio-Button

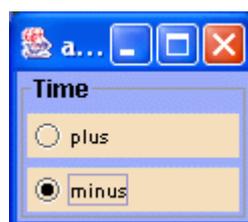


Abbildung 14: Da wir die Zeitdifferenz zwischen den beiden Daten wissen wollen, setzen wir den Operator im Tool „add/subtract Time“ auf „minus“.

um schließlich im rechten Kalendertool das Ergebnis ablesen zu können:

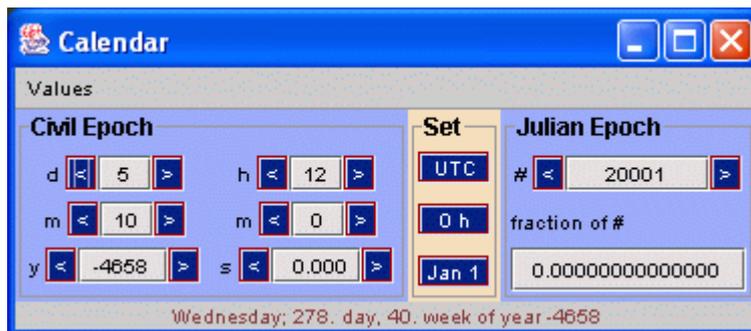


Abbildung 15: 20001 Tage liegen also zwischen dem 1.1.1950 und dem 5.10.2004. Das bürgerliche Datum, das dazu angezeigt wird, entspricht der Julianischen Tageszahl 20001, also dem Datum 1.1.-4712 + 20001, soll uns hier aber nicht weiter interessieren.

Die Julianische Tageszahl spiegelt nun die Zeitdifferenz zwischen den beiden eingetragenen Kalenderdaten wider. Am besten ignorieren wir das dazugehörige bürgerliche Datum, das nämlich dem 20001. Tag nach Beginn der Julianischen Tageszählung am 1. Januar 4713 v.Chr, bzw. mathematisch -4712, entspricht (der Tag Null am Mittag).

Zeitskala

Die in „Calendar“ eingetragene und angezeigte Zeit interpretieren wir meist stillschweigend als UTC. Bestimmte Tools erwarten aber die Zeit gemäß einer anderen Zeitskala. Beispielsweise verlangt die Berechnung der Sternzeit die Zeitskala UT1 und die der Planetenbewegungen die Zeitskala TT. Letztere wäre strenggenommen auch für die Berechnung der Präzessions- und Nutationseffekte einzusetzen, jedoch ist der Unterschied zu gering, als daß er bei einer Millibogensekunden-Genauigkeit erkennbar wäre.

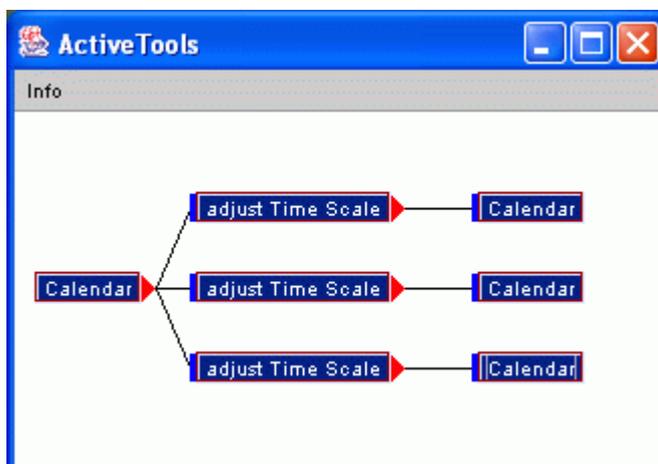


Abbildung 16: Die links in „Calendar“ vereinbarte Zeit wird als UTC interpretiert und über die drei Tools „adjust Time Scale“ jeweils nach UT1, TAI und TT umgewandelt.

Sobald wir den Schaltplan aus Abbildung 16 realisiert haben, vereinbaren wir am besten zuerst die Zeitskalen, in die wir transformieren wollen und tragen dann im linken Kalender-tool die gewünschte Ausgangsepoche ein. Falls wir nämlich nachträglich die Zeitskala ändern, passiert erst mal gar nichts. Wir müssen dann in „Calendar“ die Epoche erneut aktivieren, indem wir zum Beispiel den Cursor in eines der Textfelder setzen und die Return-Taste drücken.

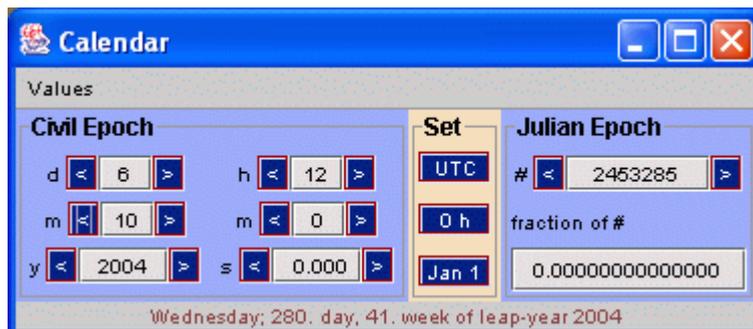


Abbildung 17: Unsere UTC-Zeit, die wir in die anderen Zeitskalen umwandeln möchten.

Die verschiedenen „adjust Time Scale“ Tools stellen wir durch Mausklick auf die entsprechenden Zeitskalen ein und können dann entweder in den rechten Kalendertools oder auch bereits direkt in den Zeitskalentools die Sekundendifferenzen ablesen:

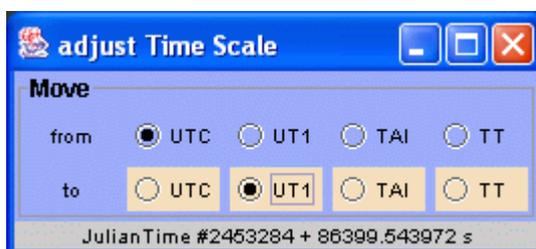


Abbildung 18: Unsere UTC-Zeit, nun als UT1 dargestellt. Es fehlen etwa 0.45 Sekunden bis Mittag.

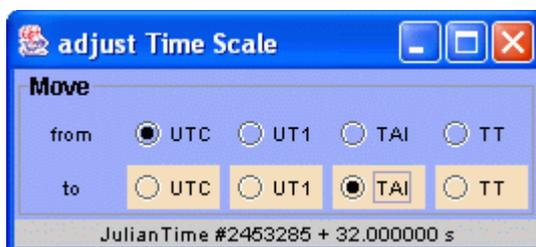


Abbildung 19: Unsere UTC-Zeit, nun als TAI dargestellt. Hier zeigen sich die mittlerweile angelaufenen 32 Schaltsekunden, die TAI „vorgeht“, bzw. UTC wegen der Verlangsamung der Erdrotation „nachgeht“.

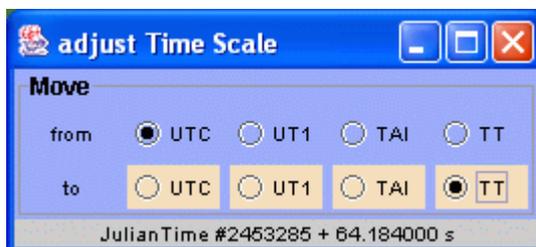


Abbildung 20: Unsere UTC-Zeit, nun als TT dargestellt. Die Differenz von 64.184 Sekunden setzt sich aus der Anzahl der Schaltsekunden und der konstanten Differenz „TT-TAI“ = 32.184 s zusammen.

„adjust Time Scale“ funktioniert nur dann vollständig, wenn für den gewünschten Zeitpunkt Erdrotationsparameter vorhanden sind (aktuelles oder frühere Bulletin B). Sind sie nicht verfügbar, werden UTC, UT1 und TAI gleichgesetzt. Lediglich für TT wird eine Approximation durchgeführt.

Sternzeit

Jeweils nach einer ganzen Erdumdrehung sind 360 Grad bzw. 24 Stunden Sternzeit (-winkel) vergangen. Und wenn von Greenwich aus betrachtet der Frühlingspunkt genau im Süden liegt, ist es 0 Uhr Sternzeit. Wegen der engen Kopplung an die Erdumdrehung ist offensichtlich die Zeitskala UT1 als Eingangsparameter für die Sternzeitberechnung vorzusehen. Ein kleines Tool kann die Anzeige der Sternzeit übernehmen.

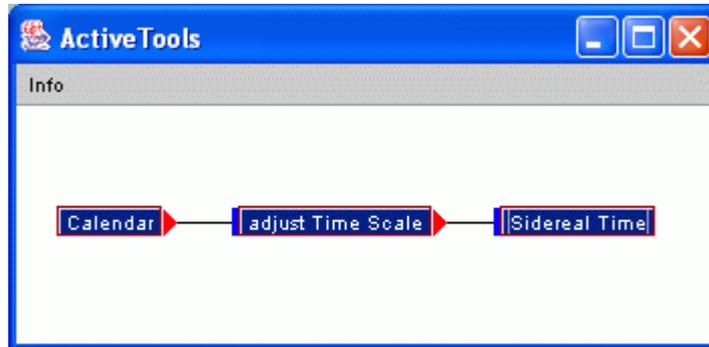


Abbildung 21: Der Schaltplan zur Darstellung der Sternzeit ist sehr einfach. Bevor wir in „Calendar“ das gewünschte Datum eintragen, markieren wir bereits in „adjust Time Scale“, daß wir am Übergang „UTC--->UT1“ interessiert sind.

Ein Mausklick auf „adjust Time Scale“ öffnet das zugehörige Toolfenster

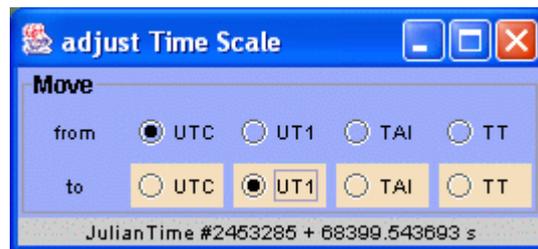


Abbildung 22: Die Zeitskala wird für den Übergang „UTC ---> UT1“ vorbereitet.

in dem wir als Ziel „UT1“ anklicken. Das wird nur dann später wirklich funktionieren, wenn zum Zeitpunkt, den wir in „Calendar“ definieren, auch Erdrotationsparameter vorhanden sind. In diesem Beispiel wählen wir die Epoche

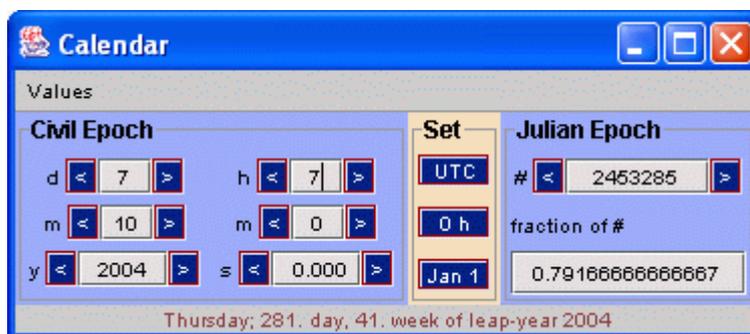


Abbildung 23: Zu dieser Epoche wollen wir die entsprechende Sternzeit wissen.

und lesen in Tool „Sidereal Time“ die Sternzeit ab:



Abbildung 24: Vor 8h 5m und 3.704 Sekunden Sternzeit (nicht mit Sonnenzeit identisch) hat der Frühlingspunkt den Meridian von Greenwich passiert. Die unterste Zeile gibt den Zeitpunkt in UT1 an.

Sie gibt uns an, vor wieviel Stunden Sternzeit die x-Achse des erdfesten Bezugssystems zum Frühlingspunkt gezeigt hatte. Zur Erinnerung: 1 h Sternzeit ist etwas kürzer als 1h Sonnenzeit (ca. 1/365, pro Tag etwa 4 Minuten). Wenn wir als Eingabe UTC, anstelle von UT1 gewählt hätten, läge der Fehler bei etwa 0.45 Sekunden. Das sind immerhin 6.75 Bogensekunden. Und das entspricht selbst bei der klassischen geodätischen Ortsbestimmung einer Abweichung vom etwa Zehnfachen der Beobachtungsgenauigkeit.

Für die Berücksichtigung des wahren, anstelle des mittleren Frühlingspunktes, muss „apparent“ anstelle von „mean“ ausgewählt werden. Die Unterscheidung ist wegen der Nutation notwendig. Klicken Sie einfach mal auf „apparent“ um die Differenz von etwa 0.6 (Sternzeit-) Sekunden zu sehen.

Sonnenzeit

Auch wenn kein eigenes Tool zur Darstellung der Sonnenzeit vorhanden ist, so verstehen wir doch unter UTC, die wir mit dem Tool „Calendar“ handhaben, genau diese.

Um 12 Uhr UTC wird nämlich die „mittlere Sonne“ den Meridian eines Ortes auf dem nullten Längengrad passieren. Die „wahre Sonne“ hält sich aber nur viermal im Jahr daran. Fast immer ist sie früher oder später dran.

Darstellen können wir die wahre Sonnenzeit mit einer Sonnenuhr, also beispielsweise mit einem senkrecht stehenden Stab dessen Schatten auf eine Skala trifft. Markieren wir jeden Tag um dieselbe Uhrzeit die Schattenposition, so stellen wir nicht nur fest, daß der Schatten mal länger und mal kürzer ausfällt, sondern auch mal mehr westlich und mal mehr östlich liegt. Die sich während eines Jahres ergebende Kurve wird als Analemma bezeichnet. Sie sieht einer „8“ sehr ähnlich.

Zeichnen wir die Zeitunterschiede „wahrer Mittag – mittlerer Mittag“ übers Jahr auf, so können wir die „Zeitgleichung“ graphisch veranschaulichen.

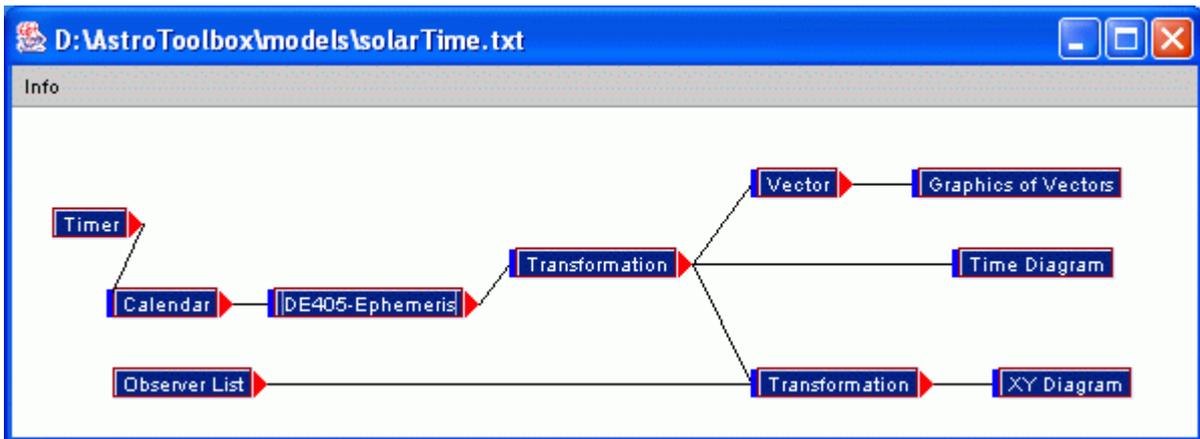


Abbildung 25: Den Schaltplan „equationOfTime.txt“ haben wir ein klein wenig abgeändert, um nicht nur die Zeitgleichung, sondern auch gleich die jährliche Bahn der Sonne am Horizont, jeweils um dieselbe Uhrzeit (z.B. 12 Uhr UTC für München) darzustellen.

Den „Calendar“ stellen wir auf das Startdatum 1.1.2004, 12 Uhr UTC. In „Timer“ vereinbaren wir einen (Sonnen-) Tag pro 0.2 Sekunden für eine zügig voranschreitende Animation. Aus „Observer List“ wählen wir „München“.

In „DE405-Ephemeris“ vereinbaren wir einen einzigen Himmelskörper, unsere Sonne.

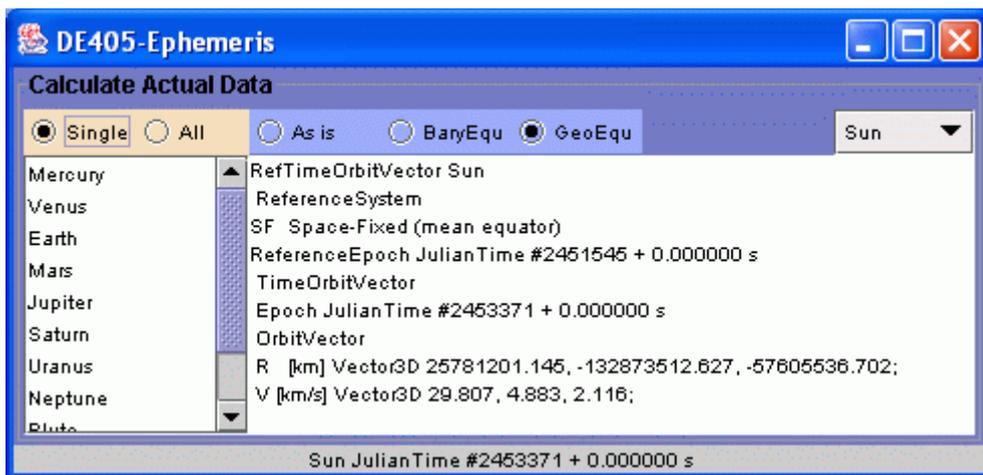


Abbildung 26: Den uns hier einzig interessierenden Himmelskörper wählen wir aus der aufklappbaren Liste rechts aus. Seine Position wird bereits im Äquatorsystem der Erde zur Standard epoche J2000 bereitgestellt. Die angezeigten Daten beziehen sich auf das letzte Datum der Animation, den 31.12.2004, 12 Uhr UTC mittags.

Die „Transformation“ in der Mitte steht bereits auf „EF: Earth Fixed (equator)“ mit den markierten Einflüssen „Aberration, Nutation, Präzession“, falls wir den Schaltplan geladen haben. Ansonsten stellen wir es so ein. Im unteren „Transformation“-Tool wählen wir als Ziel „TH: Topocenter Horizon“ ohne irgendwelche Einflüsse aus.

Bevor wir nun in „Timer“ auf „Start“ drücken, löschen wir die Inhalte der Graphikfenster über den Menüpunkt „Reset – Clear“. Nun kann es losgehen. „Start“ in „Timer“ drücken und in „Calendar“ die rasch voranschreitende Zeit beobachten. Bevor wir am Jahresende anlangen, drücken wir in „Timer“ auf „Stop“ und tasten uns im Einzelschrittverfahren bis zum 31.12.2004 vor.

Als erstes betrachten wir die Zeitgleichung (vertikale Einheit ist Stunde)

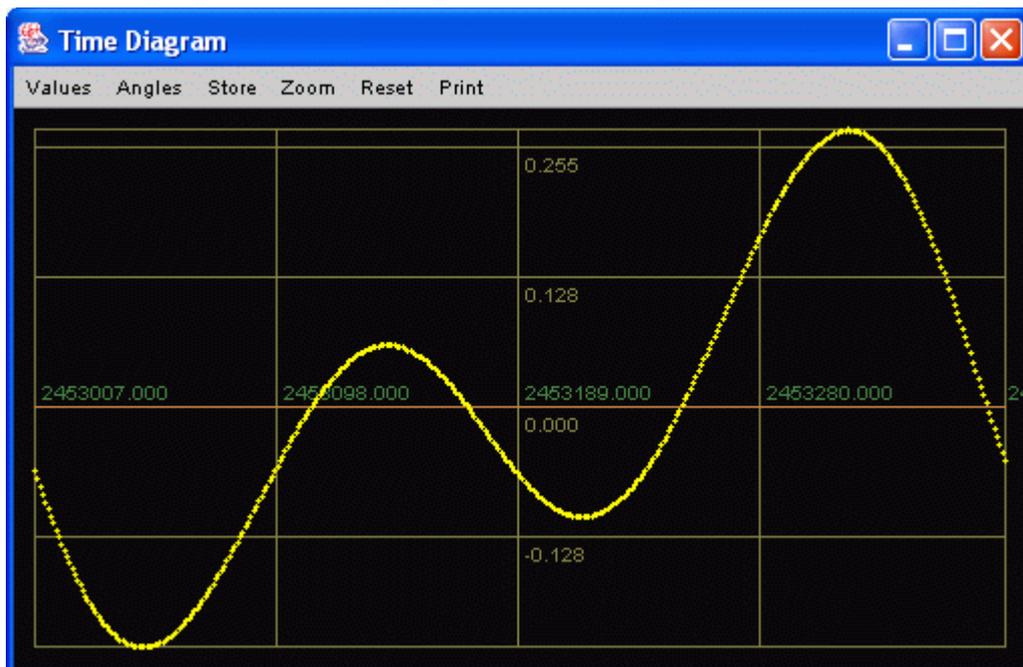


Abbildung 27: Der Unterschied „wahre – mittlere“ Sonnenzeit, die sogenannte Zeitgleichung für das Jahr 2004 in Stunden (0,1 Stunden = 6 Minuten) über der Julianischen Tageszahl aufgetragen, zeigt uns die Schwankungen des wahren (tatsächlichen) Mittags auf. Die mittlere horizontale Linie entspricht dabei dem mittleren Mittag laut UTC (12 Uhr UTC). Darüber ist früher Mittag, darunter später. Sie können interessierende Teile aus dem Diagramm herauszoomen, wenn Sie mit der Maus ein Rechteck darum ziehen (von links nach rechts). Ziehen Sie ein beliebiges Rechteck in der anderen Richtung (von rechts nach links) wird die Originalansicht wieder hergestellt.

Zur besseren Lesbarkeit sind einige Daten herausgegriffen. Sie spiegeln die Nulldurchgänge, sowie die Minima und Maxima wider und können im Tool „Vector“ unter „HA“ abgelesen werden..

Datum (ca.)	Zeitgleichung
11.02.04	-14m 13s
15.04.04	0m 0s
13.05.04	3m 42s
13.06.04	0m 0s
25.07.04	-6m 30s
01.09.04	0m 0s
02.11.04	16m 26s
24.12.04	0m 0s

Im vorliegenden Beispiel wählen wir München als Beobachtungsort um die Analemma – Kurve zu erfassen. Auch wenn um 12 Uhr UTC der wahre Mittag stets schon vorbei ist, kann die „8“ recht gut erkannt werden.

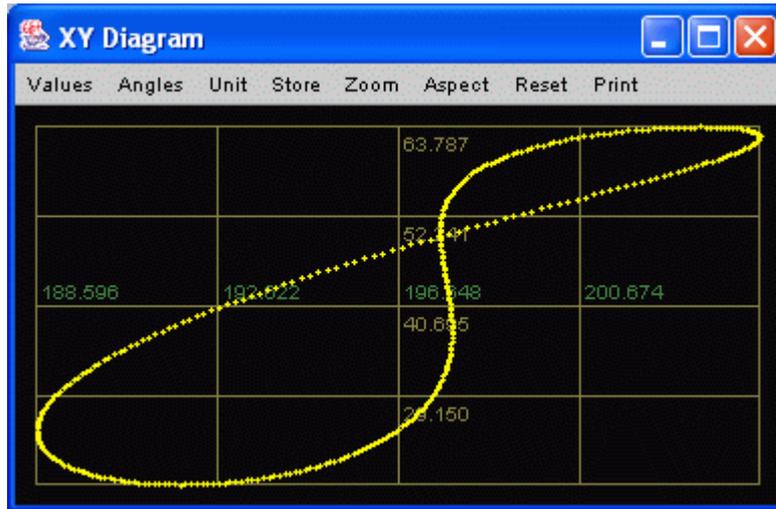


Abbildung 28: Die Analemma-Kurve für München um jeweils 12 Uhr UTC. Der mittlere Mittag wäre schon um 11:13:40.8 Uhr UTC wegen des Längenunterschieds (München-Greenwich). Verantwortlich für deren Zustandekommen ist die zur Äquatorebene geneigte, exzentrische Erdumlaufbahn.

Für das letzte Datum im Jahr 2004 lesen wir aus dem Tool „Vector“ direkt den Wert für die Zeitgleichung unter „HA“ ab:

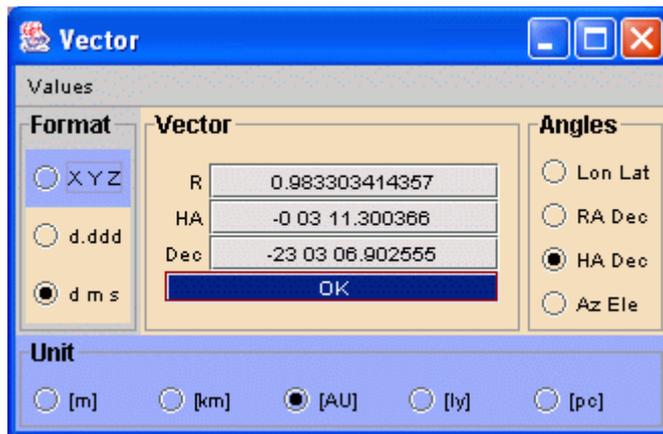


Abbildung 29: Am 31.12.2004 um 12 Uhr UTC beträgt die Differenz „wahre Sonnenzeit – mittlere Sonnenzeit“ genau – 3 Minuten und 11,3 Sekunden. Daß die Sonne dann auch der Erde näher als eine Astronomische Einheit (der mittleren Entfernung) kommt, sei nur am Rande bemerkt.

Beobachter

Nicht nur der Zeitpunkt einer Beobachtung ist von Bedeutung. Auch der Beobachtungsort muß passend festgelegt werden. Im allgemeinen bleiben weder dieser noch das anzu-messende Ziel von zeitlichen Änderungen verschont. Wir können aber für unseren Beobachtungsort auf der Erde ein Bezugssystem wählen, in dem sich die Referenzpunkte auf der Erdoberfläche möglichst wenig ändern. Das soll heißen, daß letztlich nur noch die Plattentektonik für zeitliche Variationen verantwortlich bleiben muß. Das System wird mit ITRS (International Terrestrial Reference System) bezeichnet und all paar Jahre an die gestiegenen Meßgenauigkeiten der Referenzstationen angepasst.

Eingabe von Koordinaten

Gebräuchlich sind die Angaben von Längen und Breitengraden, um einen Ort auf der Erdoberfläche eindeutig zu kennzeichnen. Sie beziehen sich auf ein Ellipsoid, das der tatsächlichen Erdform als mathematische Form möglichst nahe kommt. Mit der großen Halbachse (dem Äquatordradius) und der Abplattung ist es festgelegt. Da sich die Orte nicht direkt auf dem Ellipsoid befinden, ist noch deren Höhe über der Ellipsoidfläche anzugeben. Diese kann näherungsweise als Höhe über dem Meeresspiegel angenommen werden.

Gleichwertig ist die Angabe von kartesischen Koordinaten, meist aber weniger anschaulich. Sobald die Ellipsoidparameter fest stehen, können sie leicht in die ellipsoidischen Koordinaten umgerechnet werden. Dazu dient das Tool „Observer“ das ein Objekt mit gleichem Namen erzeugt. Alle anderen Tools, die einen Beobachter benötigen, können von diesem Tool versorgt werden. Allerdings mag diese Methode irgendwann umständlich erscheinen. Dann lassen sich die Beobachtungsorte auch aus einer Liste auswählen (Tool „Observer List“) oder in einer Erdkarte (Tool „Observer Map“) anklicken.

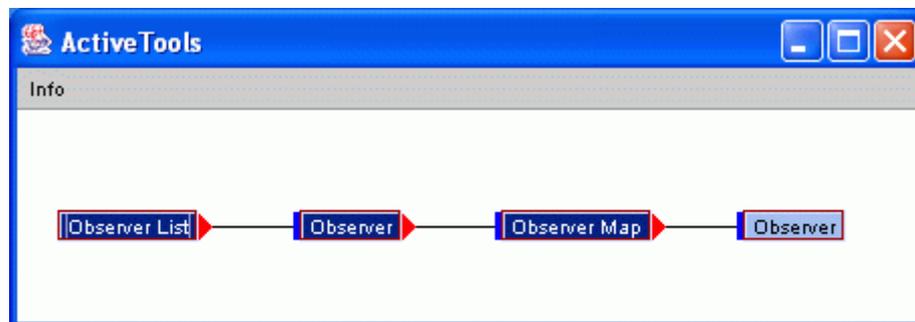


Abbildung 30: Die drei Tools zur Festlegung eines Beobachtungsortes hintereinandergeschaltet. Außer „Observer List“ können sie sowohl einen „Observer“ (Objekt) empfangen (und darstellen) , als auch verschicken. Der letzte Observer rechts kann die Koordinaten von Punkten wiedergeben, die in der Karte angeklickt worden sind. Theoretisch könnte auch „Observer Map“ rückwärts mit dem linken „Observer“ verbunden werden, aber dann ergibt sich eine Endlosschleife zwischen den beiden. Wenn wir Glück haben, können wir diese mit „Verbindung entfernen“ (ALT-Taste und Verbindungslinie nachziehen) wieder beenden.

Zur Demonstration wählen wir in „Observer List“ den Eintrag für „Ascension Is.“



Abbildung 31: Die Insel Ascension wird aus der Liste ausgewählt.

und können sowohl deren Koordinaten in „Observer“ ablesen

Observer		Ellipsoid		Ellipsoidal Coords	
Cartesian Coords		Ellipsoid		Ellipsoidal Coords	
X	6128848.633	R	6378137.000	Lon	-14 00 00.000
Y	-1528093.589	f	0.003352811	Lat	-8 00 00.000
Z	-881779.906	1/f	298.2572	H	0.000
Enter		Reset Ellipsoid		Enter	

Abbildung 32: Die Koordinaten unseres gewählten Beobachtungsortes (Ascension Is.)

als auch deren Position auf einer Erdkarte

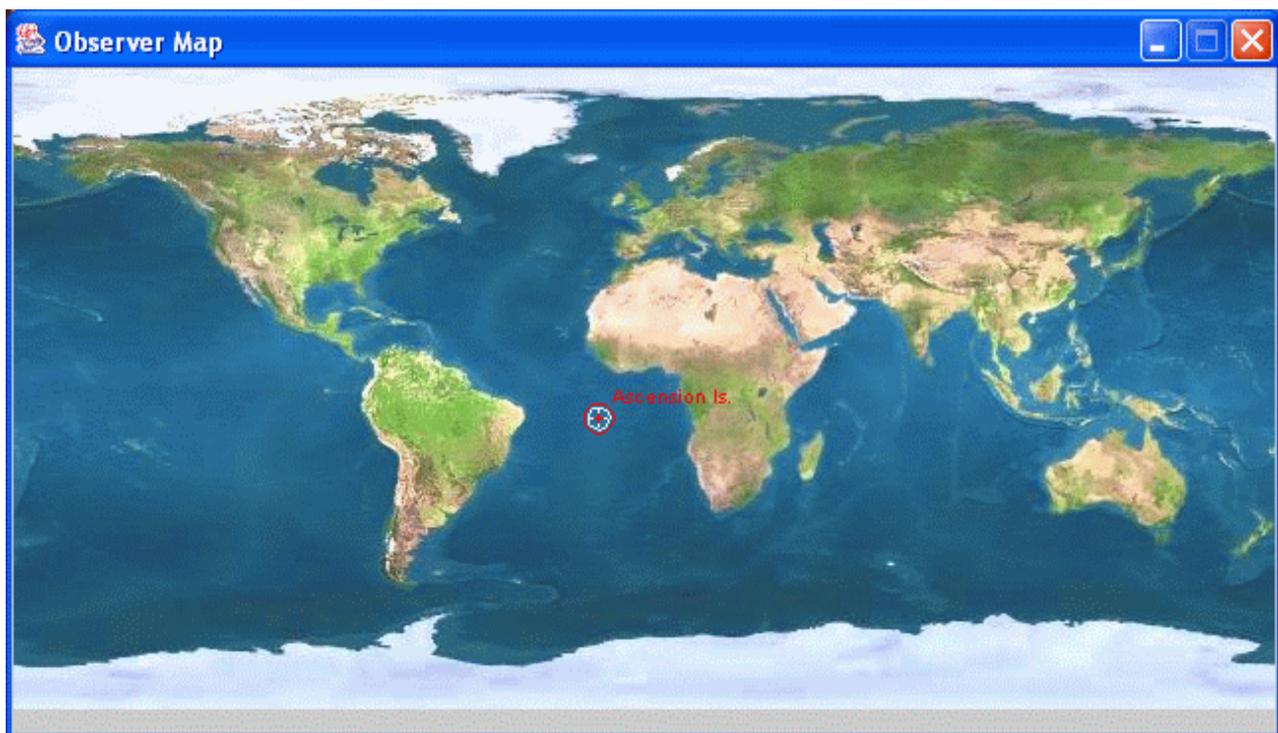


Abbildung 33: Mitten im Atlantik taucht die Markierung für „Ascension Is.“ auf.

Die Orientierung der Erde im Raum

Wäre die Erde der einzige Himmelskörper, der um die Sonne läuft, und stünde die Rotationsachse genau senkrecht auf der Umlaufebene (der Ekliptik) und wären Sonne und Erde perfekte Kugeln mit radialsymmetrischem Dichteaufbau, könnten wir uns dieses Kapitel sparen. Alles wäre dann sehr einfach und ... langweilig. Keine Jahreszeiten, an den Polen wäre es immer hell, die Sonne ginge immer am exakt gleichen Ostpunkt auf und Westpunkt unter. Auch die Sterne folgten stets den gleichen Bahnen am Firmament. Positions-astronomie wäre sehr einfach. Nur eine einzige Transformation führte vom raumfesten ins erdfeste Referenzsystem und das wäre es dann auch schon.

Doch „zum Glück“ gibt es weitere Himmelskörper in unserem Sonnensystem, und es sind auch alle nicht rotationssymmetrisch aufgebaut. Die Erde rotiert um eine Achse, die gegenüber der Ekliptik geneigt ist und aufgrund der Gravitationskräfte der anderen Himmelskörper selbst um eine mittlere Achse rotiert. Zum einen langperiodisch (Präzession, knapp 26000 Jahre) und zum anderen kurzperiodisch (Nutation, etwa 18,5 Jahre). Schließlich unterliegt sie dann noch weiteren Schwankungen, die nicht alle vollständig modelliert sind und sich daher als stochastische Unregelmässigkeiten niederschlagen (Polbewegung).

Ekliptik

Jahreszeitliche Veränderungen unserer natürlichen Umgebung verdanken wir der Tatsache, daß die Äquatorebene der Erde gegenüber der Ekliptikebene um etwa 23 Grad geneigt ist.

Für die Darstellung der aktuellen Ekliptikschiefe gibt es kein eigenes Tool. Sie ist aber in der Transformation vom Ekliptiksystem ins Äquatorsystem der Erde enthalten. Nimmt man ein mittleres Äquatorsystem an, so spricht man von der mittleren Schiefe. Transformiert man aber ins wahre Äquatorsystem, so handelt es sich um die wahre Schiefe. Generell wird bei mittleren Systemen die Nutation vernachlässigt, während sie bei wahren Systemen enthalten ist. Von der Größenordnung her mag es durchaus gerechtfertigt erscheinen, die wenigen Bogensekunden im Vergleich zu den etwa 23 Grad unter den Tisch fallen zu lassen. Die Transformation selbst ist nur eine Rotation um die x-Achse um den Winkel der Ekliptikschiefe. Wenn wir also den Vektor (0, 1, 0) dieser Transformation unterwerfen und das Ergebnis als Länge und Breite mit dem Tool „Vector“ anzeigen, können wir direkt den Neigungswinkel ablesen.

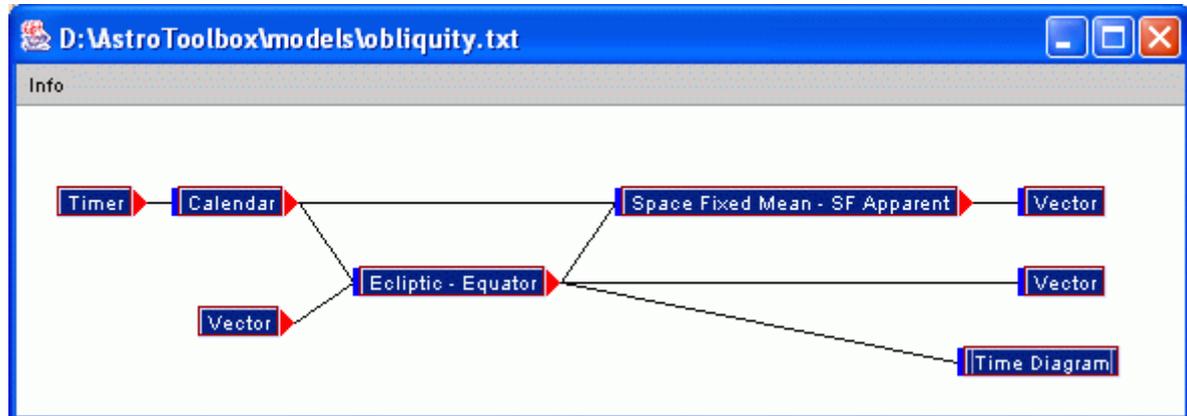


Abbildung 34: Mit der Transformation „Ecliptic - Equator“ transformieren wir den Vektor (0,1,0) vom Ekliptiksystem ins mittlere Äquatorsystem. Das „Vector“-Tool Mitte rechts zeigt uns daher die mittlere Schiefe an. Hängt man daran noch die Transformation „Space Fixed Mean – SF Apparent“ erhalten wir im „Vector“-Tool rechts oben die wahre Ekliptikschiefe zum Zeitpunkt, den wir in Calendar eingetragen haben. Schliesslich können wir mit dem Timer noch eine Animationssequenz starten, um die zeitliche Entwicklung der Schiefe als Diagramm zu veranschaulichen.

Den bereits vordefinierten Schaltplan laden wir aus der Model-Datei „obliquity.txt“. Die Eingabetools sollten dann auch bereits wie folgt aussehen:

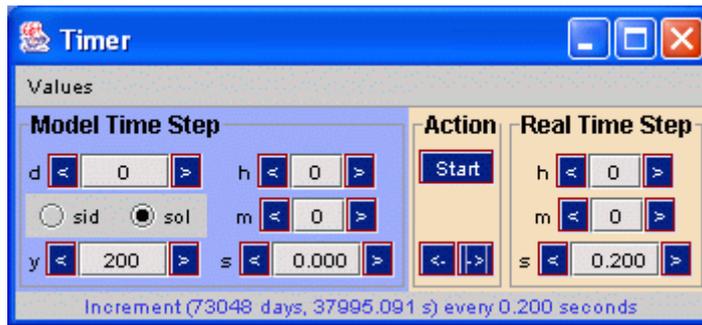


Abbildung 35: Zur Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklung werden wir alle 0,2 Sekunden einen Zeitschritt von 200 Jahren erzeugen.

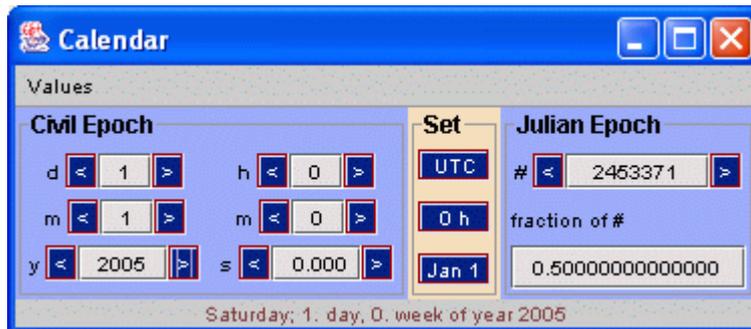


Abbildung 36: Zu diesem Datum ermitteln wir die aktuellen Werte (mittlerer und wahrer) der Ekliptikschiefe, die wir den beiden „Vector“-Tools entnehmen können. Für die graphische Darstellung werden wir ein Anfangsdatum von Anfang -10000 Jahre wählen und über den Timer bis zum Jahre +14000 laufen lassen.

und schließlich der zu transformierende Vektor:

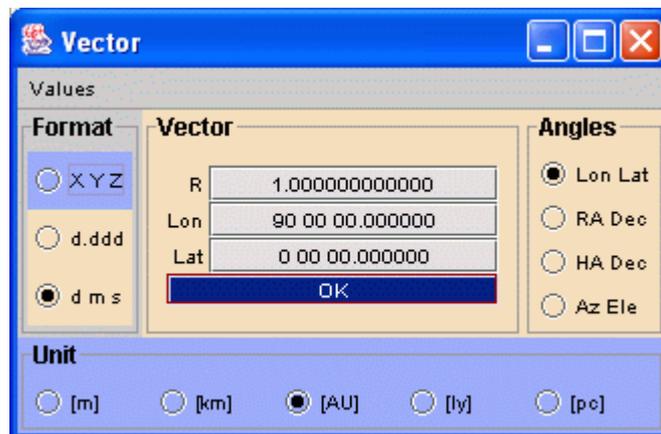


Abbildung 37: Der Vektor, der in y-Richtung zeigt und in der x-y-Ebene liegt, „spürt“ die Rotation um die x-Achse maximal und spiegelt daher den vollen Winkel der Schiefe der Ekliptik wider.

Die beiden „Vector“-Tools rechts zeigen uns in der Breite (Lat) die wahre (oben)

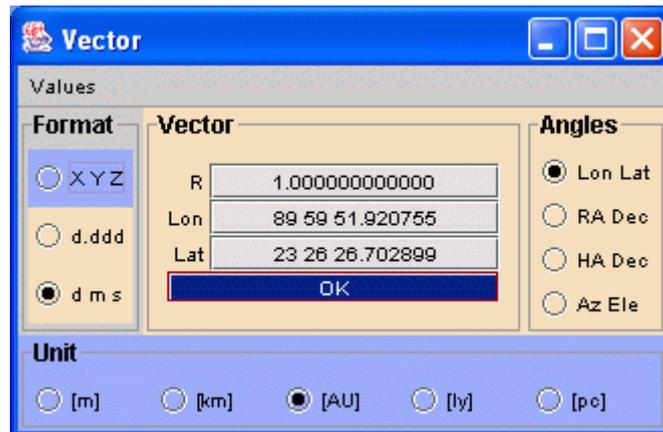


Abbildung 38: Unter „Lat“, der Breite des Ergebnisvektors (oben rechts), können wir direkt die wahre Ekliptikschiefe zur gewählten Epoche (1.1.2005) ablesen.

und die mittlere (Mitte) Ekliptikschiefe:

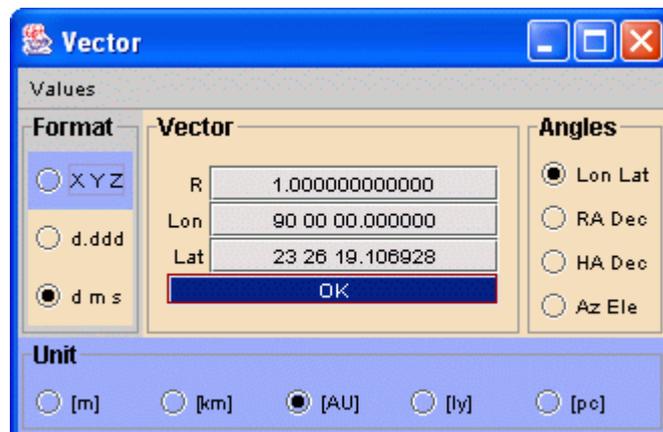


Abbildung 39: Unter „Lat“, der Breite des Ergebnisvektors (Mitte rechts), lesen wir direkt die mittlere Ekliptikschiefe zur gewählten Epoche (1.1.2005) ab.

Die zeitliche Entwicklung der Neigung Ekliptik-Äquator ermitteln wir über den Zeitraum -10000 Jahre bis + 14000 Jahre. Klar zu erkennen ist die kubische Näherungsformel, die nur in der näheren Umgebung der Bezugs-Epoche (J2000) genaue Ergebnisse liefern kann.

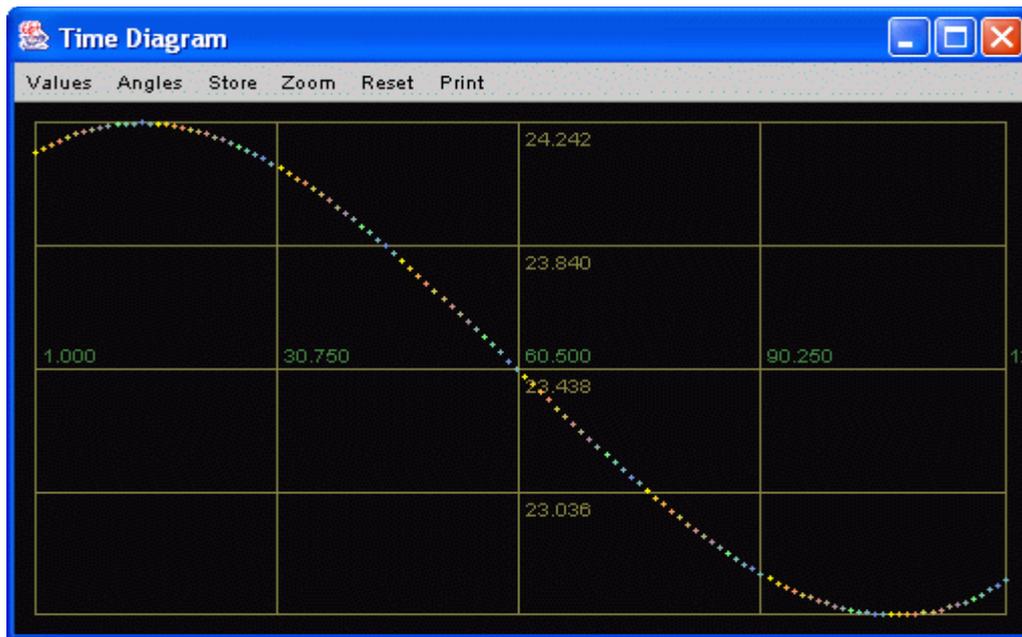


Abbildung 40: Die Veränderung der Ekliptikneigung während 24 000 Jahren. In der Mitte findet sich der zur Zeit aktuelle Wert wieder.

Orientierung der Rotationsachse

Zum einen schwankt die Rotationsachse der Erde bezüglich des Erdkörpers selbst (Pol-Bewegung) und zum anderen bezüglich eines raumfesten Systems, wie dem ICRS (Präzession und Nutation). Um die verschiedenen Einflüsse zu veranschaulichen, entwerfen wir folgenden Schaltplan:

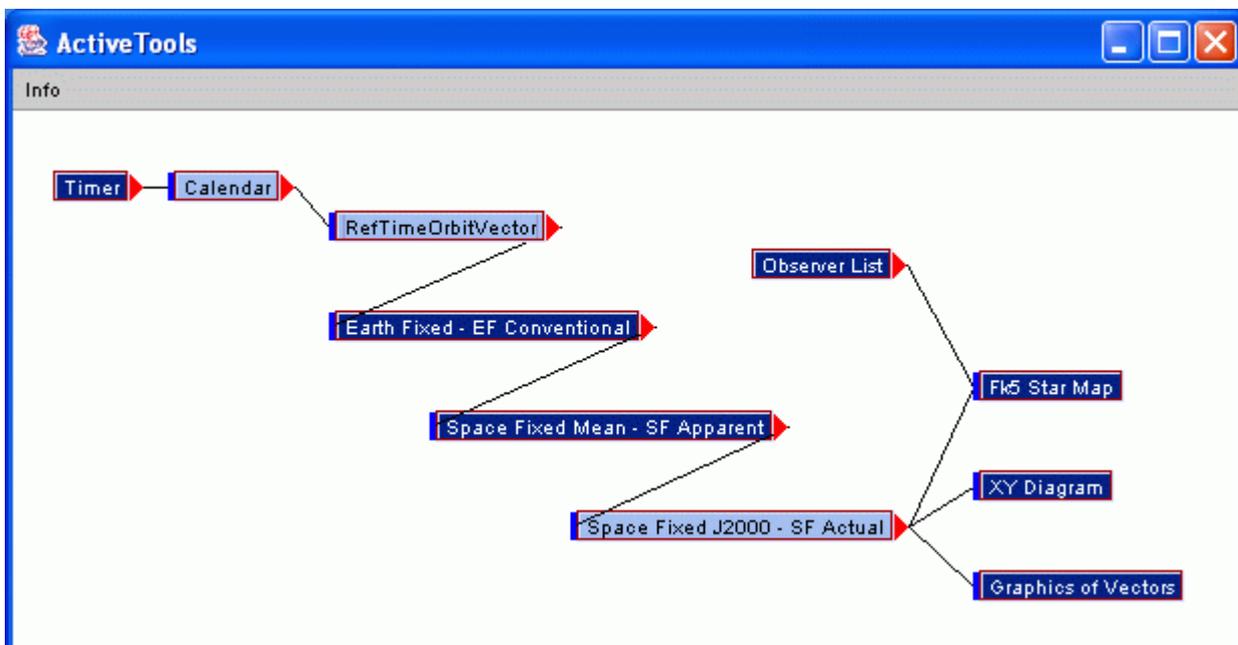


Abbildung 41: Mit diesem Toolgeflecht können wir die Orientierung der Rotationsachse der Erde im raumfesten Äquatorsystem J2000 (ICRS) veranschaulichen. Da die Perioden recht unterschiedlich sind, werden wir drei Durchgänge starten: Vom Jahr -11000 bis zum Jahr 15000 in 100-Jahresschritten für die Präzession, vom Jahr 1960 bis zum Jahr 2040 in 180-Tagesschritten für die Nutation und vom Jahr 1993 bis 2004 in 15-Tagesschritten für die Polbewegung.

Alle Transformationen werden rückwärts eingestellt. In „RefTimeOrbitVector“ tragen wir den Namen „Pol“ ein (nicht wirklich notwendig) und die z-Ortskomponente mit 6352 km. Diesen Polvektor betrachten wir als im vereinbarten erdfesten Äquatorsystem zur jeweiligen Epoche gegeben (ITRS). Die folgenden Transformationen laufen alle rückwärts, damit wir schlussendlich im raumfesten Äquatorsystem zur Epoche J2000 anlangen.

Betrachten wir zunächst die Polbahn während 26000 Jahren:

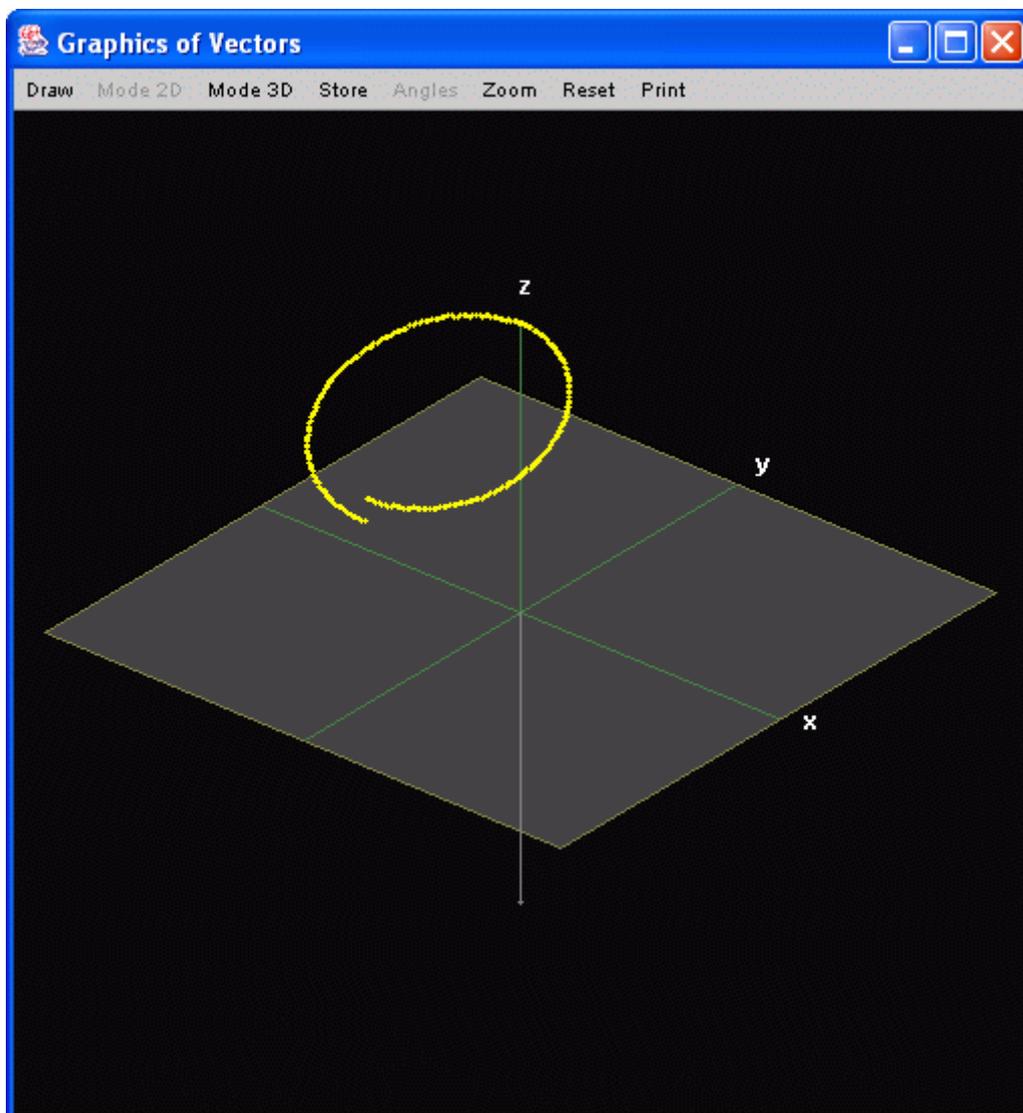


Abbildung 42: Wir sehen direkt den Einfluss der Präzession auf die Rotationsachse der Erde während 26000 Jahren. Auf der Spitze der z-Achse gilt das Datum J2000, links davon ist früher, rechts davon später. Die Öffnung des „Kegels“ beträgt etwa 46 Grad, die doppelte Ekliptikschiefe. Sie können mit der Maus in das Diagramm klicken und bei gedrückter linker Maustaste die Maus hin- und herbewegen um verschiedene 3D-Ansichten zu bekommen.

Zur Zeit befindet sich ja in unmittelbarer Nähe des Himmelsnordpols (der Polachse der Erde, verlängert bis zur Himmelssphäre) der Stern α -Ursae minoris oder auch Polaris genannt. Wie sich der Himmelsnordpol vor dem Sternhintergrund bewegt, entnehmen wir dem Tool „Fk5 Star Map“:

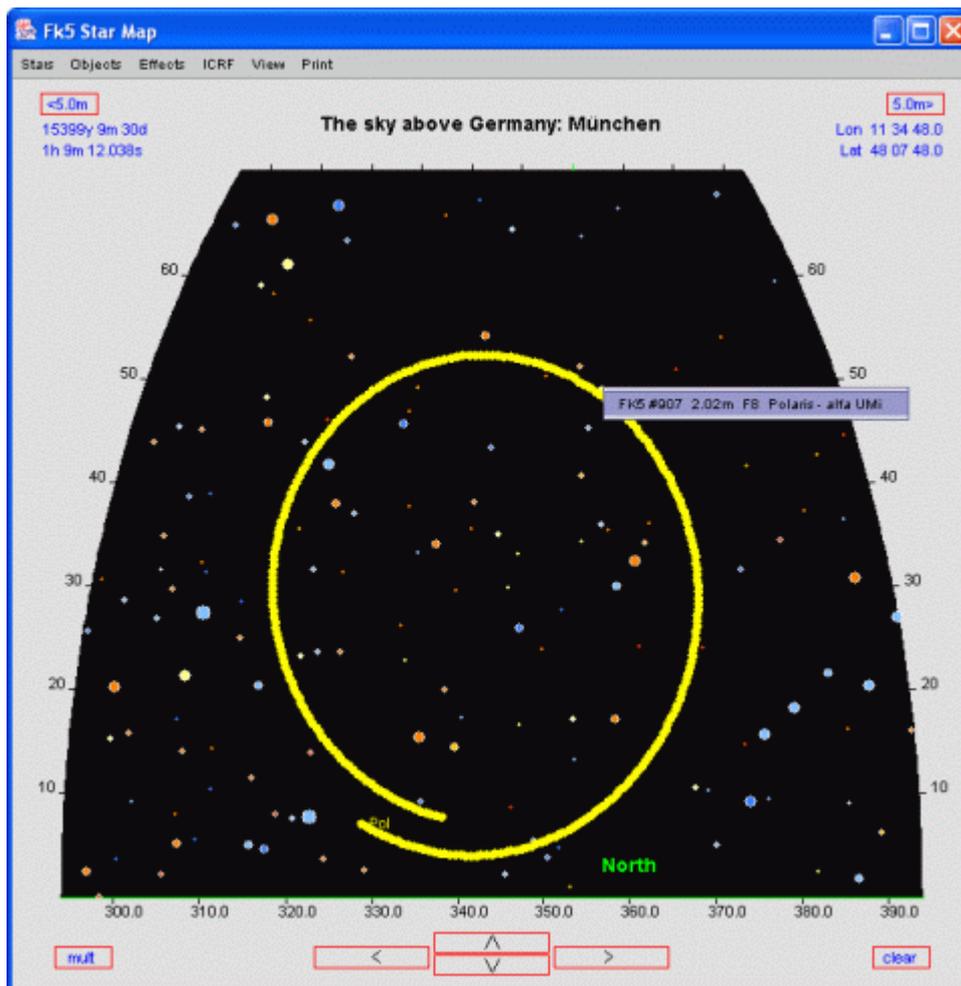


Abbildung 43: Nachdem wir in „Observer List“ den Ort München ausgewählt und in diesem Tool „Fk5 Star Map“ alle „Effects“ ausgeklickt haben, erhalten wir für die 26000 Jahre den Verlauf des Himmelsnordpols (Umlaufsinn ist gegen den Uhrzeiger, weil wir jetzt quasi von innen auf die Himmelskugel blicken). In „RefTimeOrbitVector“ muß für diese Darstellung allerdings ein viel viel größerer Vektor (100 000 Lichtjahre in der z-Richtung) eingestellt werden. Mitte rechts zeigt die Markierung mit der linken oberen Ecke die Position des derzeitigen Himmelsnordpols (Polaris) an. Die Abbildung wurde auf 70% verkleinert.

Für die weitere Untersuchung schließen wir an die Darstellung in Abbildung 42 an und projizieren die Kurve auf die x-y-Ebene:

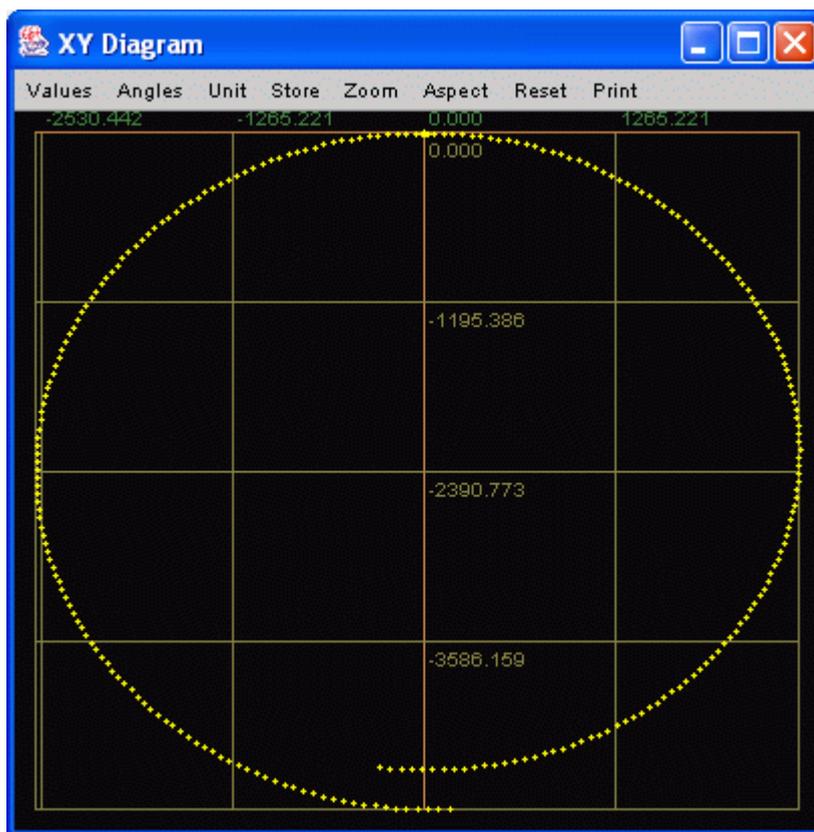


Abbildung 44: Die Projektion der Polbahn auf die x-y-Ebene. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Punkten beträgt 100 Jahre. Oben in der Mitte gilt der Zeitpunkt J2000 (1.1.2000 12 Uhr UTC) , rechts ist später, links früher, der Zeitablauf hier also im Uhrzeigersinn. Als Einheit war „km“ eingestellt.

Aus dem x-y-Diagramm (Abbildung 44) zoomen wir den kleinen Teil in der Mitte oben heraus. Dazu ziehen wir mit der Maus ein Rechteck auf und zwar von links oben nach rechts unten. Falls wir mit dem Ausschnitt nicht zufrieden sind, ziehen wir irgendwo im Diagramm ein Rechteck von rechts oben nach links unten auf und erhalten die Originalansicht zurück.

Als erstes Zoom-Ergebnis könnten wir folgendes Bild erhalten:



Abbildung 45: Zunächst zoomen wir aus der vorigen Abbildung einen kleinen Bereich heraus, dessen durchgehende Linie in der Mitte oben den Jahren 1960 bis 2040 im 180-Tagesabstand entspricht. Die weiter auseinanderliegenden Punkte stammen aus der 100-Jahre Animation.

Da nur eine kleine durchgehende Linie oben in der Mitte erkennbar ist, zoomen wir ein weiteres Mal:

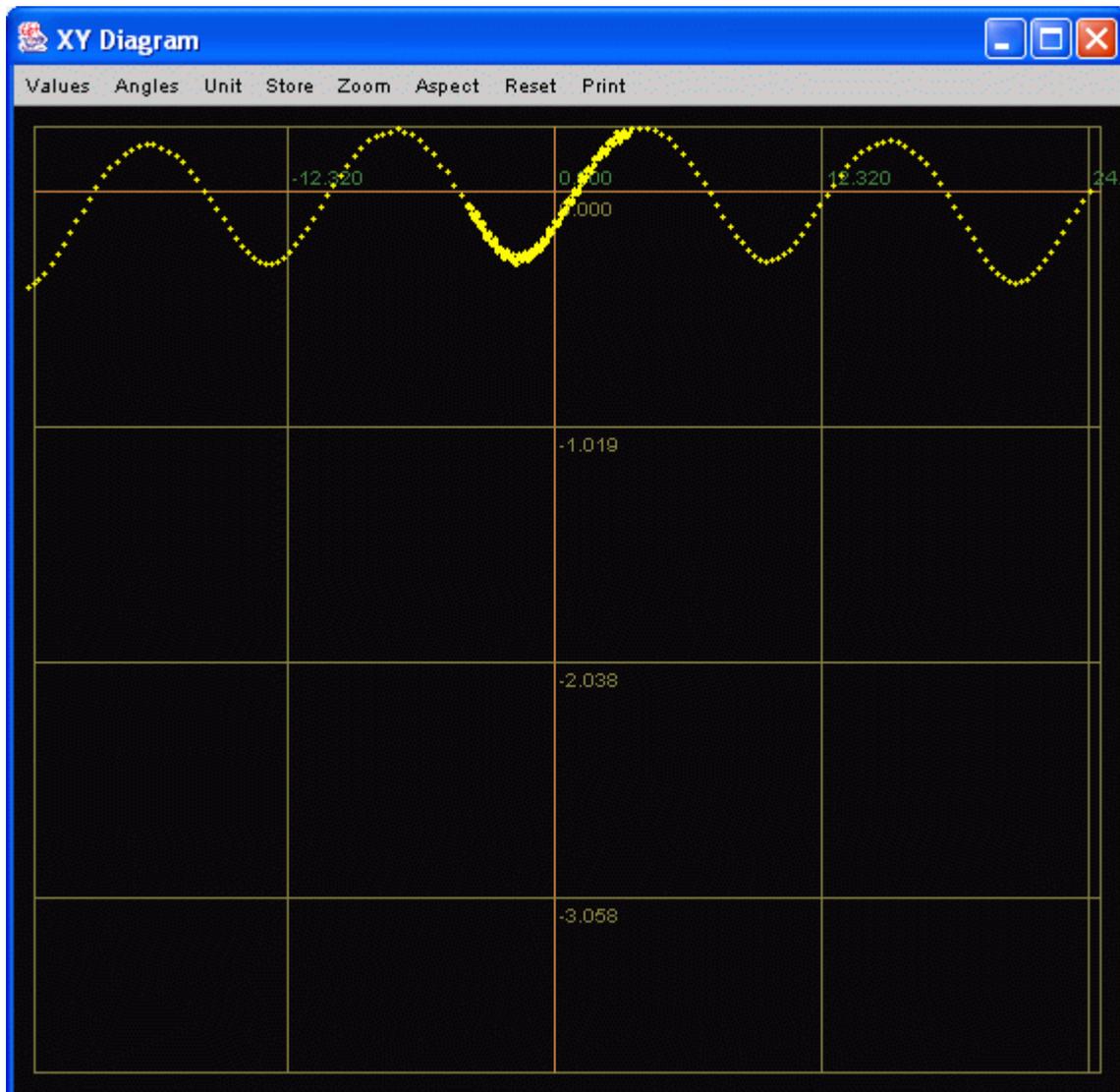


Abbildung 46: Nun entpuppt sich die gerade Linie aus der vorigen Abbildung als gewellte Kurve. Sie spiegelt den Nutationseinfluß der Jahre 1960 bis 2040 wider. Der zeitliche Abstand zweier Punkte beträgt am Rand 180 Tage, in der Mitte zeigt sich eine dichtere Punktwolke. Sie wird durch die Polbewegung, die im 15-Tages-Rhythmus erzeugt worden ist, verursacht.

Nun erkennen wir sehr deutlich die kurzperiodischen Schwankungen, die von der Nutation verursacht werden. Die Periode liegt bei etwa 18,5 Jahren. Den „verdickten“ Bereich in der Mitte oben können wir durch einen weiteren Zoomvorgang auflösen:

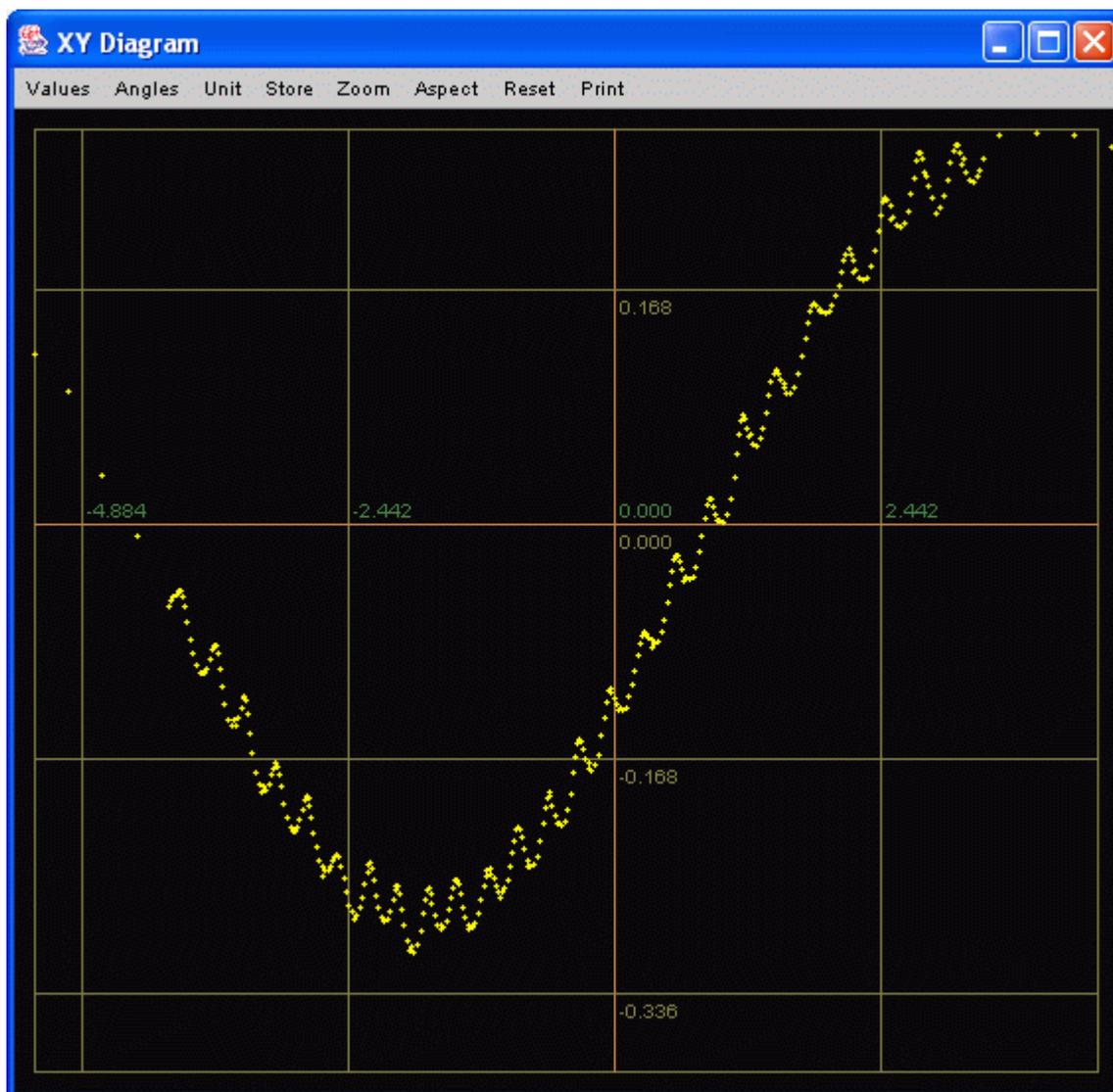


Abbildung 47: Endlich erkennen wir im 15-tägigen Punktmuster für den Zeitraum 1993 bis 2004 deutlich die 14-monatige Schwankung des Rotationspols (Chandler-Periode).

Schließlich hat auch die letzte langgezogene Punktwolke ihre Geheimnisse preisgegeben. Mit einer Hauptperiode von ca. 14 Monaten ist dies die Bewegung des aktuellen Rotationspols relativ zum vereinbarten Rotationspol, auch als Polbewegung bezeichnet.

Nicht nur die Perioden sind sehr unterschiedlich, auch die Amplituden. Die Präzession beschreibt einen Kegel mit etwa 46 Grad Öffnung, die Nutation schwankt um die 20 Bogensekunden hin und her und die Polbewegung bleibt unter einer Bogensekunde.

Als letzter Parameter zur Beschreibung der Erdrotation kommt noch die Rotationsgeschwindigkeit hinzu. Sie entspricht dem Zeitverlauf von UT1 und weist ausserdem noch mehr oder weniger regelmässige Abweichungen im Millisekundenbereich auf.

Und von diesem hin und her schwankenden „Raumschiff Erde“ aus, sollen wir die Sterne und andere Himmelskörper beobachten und deren Positionen möglichst genau erfassen ?

Orbit

Jede Umlaufbahn eines Himmelskörpers, sei er nun künstlich oder natürlich, lässt sich als Ellipse idealisieren, in deren einem Brennpunkt der Zentralkörper befindet, der umrundet wird. Kepler erzielte mit dieser Annahme den Durchbruch bei der Beschreibung von Planetenbahnen, daher wird diese idealisierte Ellipse auch gerne als Kepler-Ellipse bezeichnet.

Eine Kepler-Ellipse gibt es nur bei zwei Körpern, die beide als Massepunkte angenommen werden und bei denen die Masse des umlaufenden Körpers gegenüber der Masse des zentralen Körpers als völlig vernachlässigbar gelten kann. Somit kann sie nur in der Theorie existieren. In der Praxis sind meist mehr als zwei Körper beteiligt, die zudem ausgedehnt und unregelmäßig aufgebaut sind. Nun ist das aber oft nicht so schlimm, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag, so daß meistens immer noch eine Kepler-Ellipse, nun aber mit geringen Störungen, zur Beschreibung der Umlaufbahnen herangezogen werden kann.

Während bei der Kepler-Ellipse nur die „Mittlere Anomalie“ zeitabhängig ist, ändern sich bei realen Bahnen auch die anderen Parameter. Streng genommen liegt natürlich keine Ellipse mehr vor, aber zumindest so etwas „Ähnliches“.

Mit dem Tool „Orbit“ allein lassen sich Bahnelemente, die eine Kepler-Ellipse beschreiben, in die zugehörigen Orts- und Geschwindigkeitsvektoren, die sogenannten Orbit-Vektoren, umrechnen. Das Bindeglied zwischen beiden (völlig gleichwertigen) Darstellungsmöglichkeiten bildet eine Größe, die sich aus dem Produkt der zentralen Masse mit der Newton'schen Gravitationskonstanten ergibt (GM).

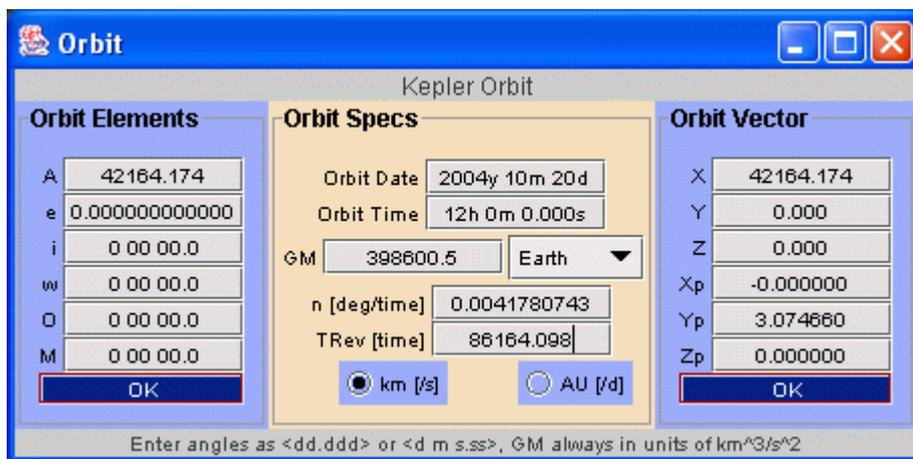


Abbildung 48: Das Tool „Orbit“ zur Umrechnung von Bahnelementen in Orts- und Geschwindigkeitsvektor ist für sich allein funktionsfähig. Es kann aber auch an andere „Orbit“-Tools angehängt werden um deren Details zu offenbaren oder andere Tools mit einem Orbit oder einem Orbitvektor versorgen.

Hier wurde als Zentralkörper die Erde angenommen um die in der Äquatorebene ein Satellit kreist und zwar so, daß ein Umlauf genau einen Sterntag benötigt. Die entsprechende Eingabe erfolgte im Feld „TRev“. Als „Große Halbachse“ lesen wir 42164.174 Kilometer ab. Das sind knapp 36000 km über der Erdoberfläche. Viele Kommunikationssatelliten sind in diesem geostationären Orbit angesiedelt, da sie nur dort über der Erdoberfläche still zu stehen scheinen. In Wirklichkeit bewegen sie sich mit etwas über 3 Kilometern pro Sekunde!

Setzen wir vor das „Orbit“-Tool einen „Calendar“ und einen „Timer“ und dahinter ein Tool „Graphics of Vectors“, so können wir die Umlaufbahn veranschaulichen:

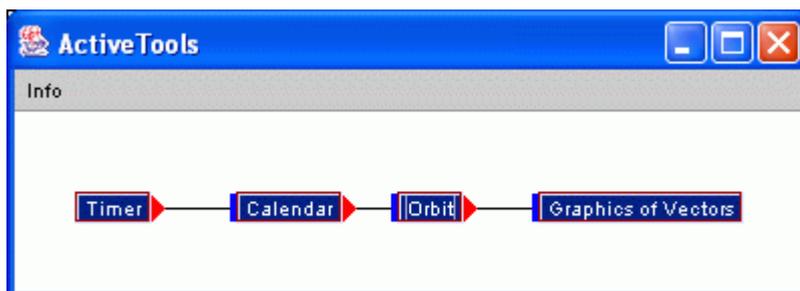


Abbildung 49: Wir umrahmen das Tool „Orbit“ mit „Timer“ und „Calendar“ zur Linken und mit dem Tool „Graphics of Vectors“ zur Rechten. „Calendar“ wird auf 12 Uhr gestellt und über den „Timer“ mit 30-Minuten-Schritten versorgt.

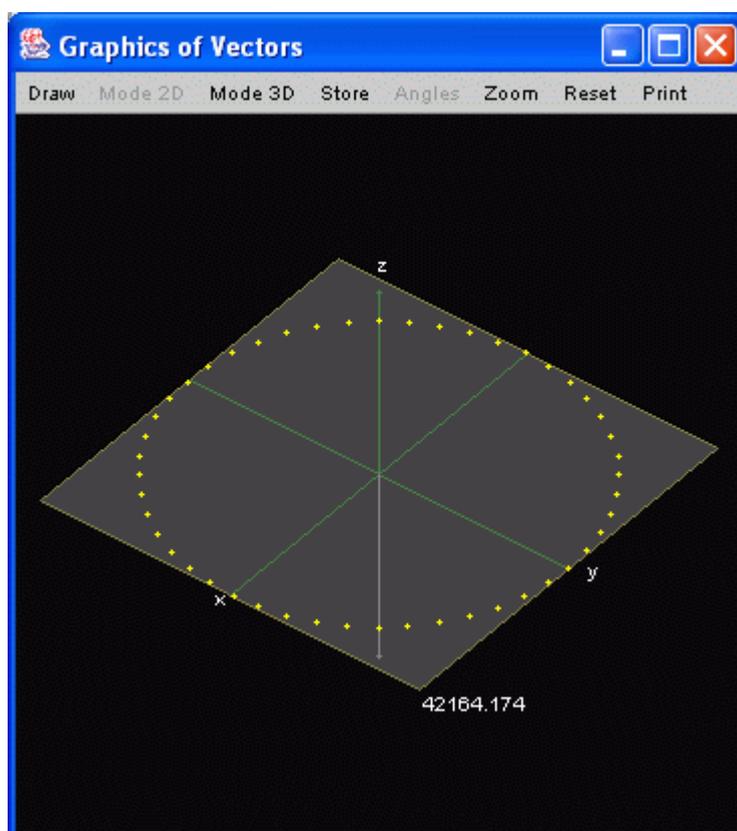


Abbildung 50: Nach genau vierundzwanzig Stunden ist ein kompletter Umlauf sichtbar. In der Tat ist es schon ein wenig mehr, da die „Mittlere Anomalie“ nicht bei Null, sondern schon bei „0 59 08.2“ steht (Grad Minute Sekunden). Nach einem Jahr wäre der Kreis schon wieder voll, d.h. Nach 365 Sonnentagen sind 366 Sterntage vergangen.

Planetenbahn

Zur Beschreibung von Planetenbahnen kann näherungsweise auf Ellipsen zurückgegriffen werden. Nun ändern sich aber bis auf die „Große Halbachse“ alle Bahnelemente mit der Zeit. Daß die „Große Halbachse“ gleich bleibt, hat direkt mit der Energieerhaltung zu tun. Man spricht von mittleren Bahnelementen, die über kubische Funktionen mit der Zeit verknüpft werden. Meist sind sie zur jeweiligen aktuellen Epoche gegeben, d.h. sie beinhalten bereits den Einfluß der Präzession. Als Bezugssystem dient dann das heliozentrische Ekliptiksystem, weil die Planeten fast alle nahe der Ekliptikebene um die Sonne laufen.

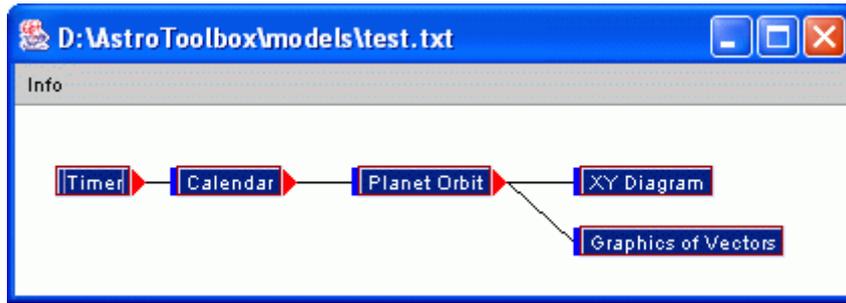


Abbildung 51: Anstelle des allgemeinen Tools „Orbit“, verwenden wir hier das Tool „Planet Orbit“, das mit mittleren Bahnelementen zur jeweils aktuellen Epoche arbeitet und die Auswahl eines, mehrerer oder aller Planeten gestattet. Zur Veranschaulichung dienen die beiden Tools „XY Diagram“ (ebene Darstellung) und „Graphics of Vectors“ (räumliche Darstellung).

Aus „Planet Orbit“ wählen wir in der linken Liste die äußeren Planeten Jupiter bis Pluto aus:



Abbildung 52: In „Planet Orbit“ markieren wir in der Liste links die äußeren Planeten Jupiter bis Pluto. Diese werden dann in der Animation berücksichtigt. Aus der aufklappbaren Liste rechts hätten wir nur einen einzigen Planeten auswählen können. Dessen Daten würden dann aber auch stets im Fenster erscheinen, falls nicht links auch etwas ausgewählt wurde und nicht „All“ angeklickt ist.

In „Calendar“ vereinbaren wir das Startdatum 1.1.1900 und in „Timer“ 1 Jahr pro 0.5 Sekunden (oder auch 0.2 Sekunden, falls es schneller gehen soll). Bevor wir „Start“ in „Timer“ drücken, löschen wir die intermediären Punkte in den beiden Graphik-Tools (Menüpunkt „Reset – Clear“), die sonst nur stören würden. Aber dann kann es „losgehen“.

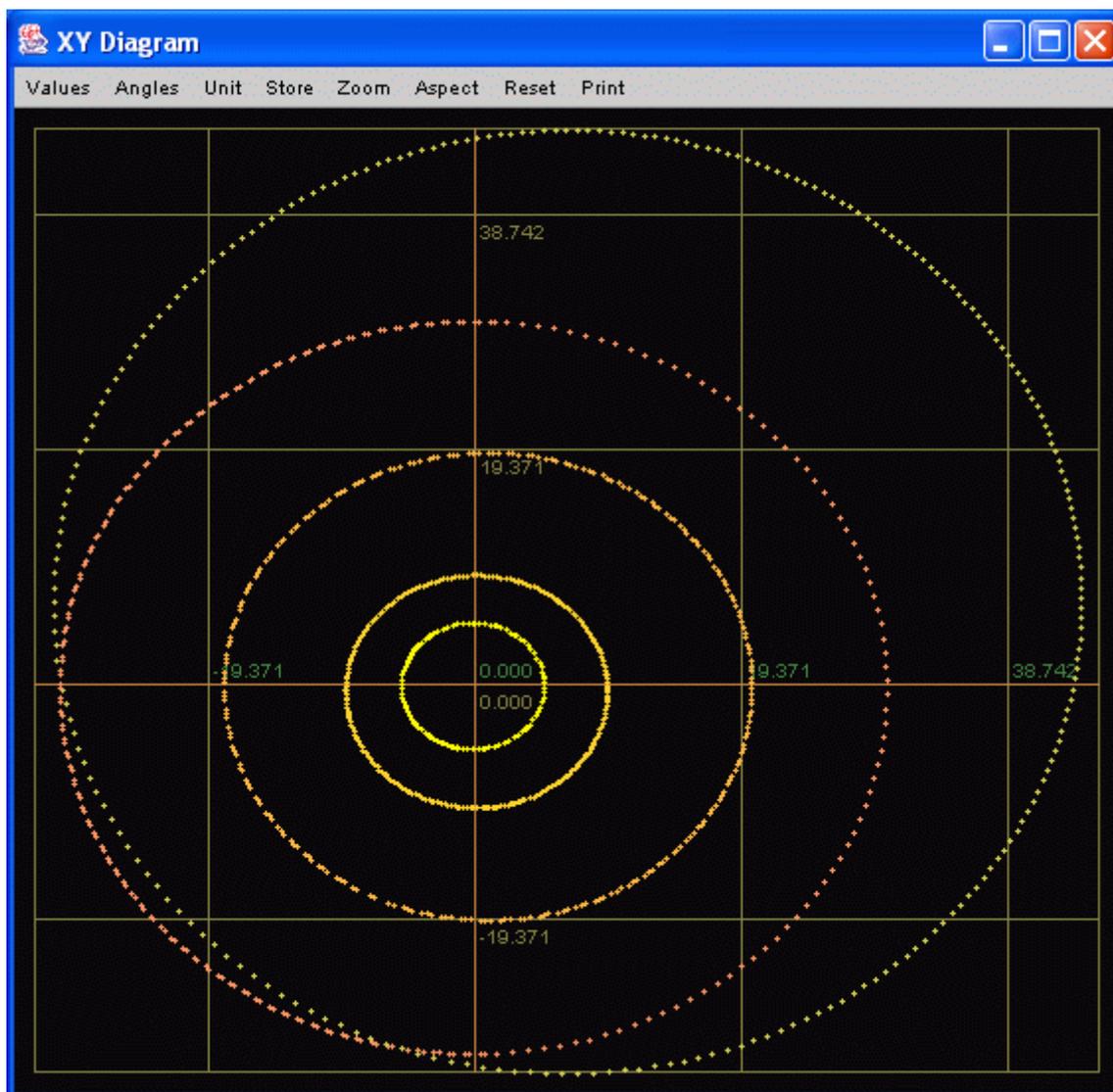


Abbildung 53: Nach etwa 256 (Modell-) Jahren (komprimiert auf wenige Minuten, je nach Timer-Einstellung) sehen wir, daß Pluto (äußerste Bahn) gerade einen Umlauf vollendet hat. Während dieser Zeitspanne haben die weiter innen liegenden Planeten die Sonnen zum Teil schon vielfach umrundet. Es sieht so aus, als ob Pluto die Bahn des Neptun schneidet. Klarheit kann hier nur eine räumliche Betrachtung liefern.

Um zu klären, ob die Pluto-Bahn tatsächlich die Bahn des Neptun schneidet, werfen wir einen Blick auf die 3D-Darstellung in Tool „Graphics of Vectors“:

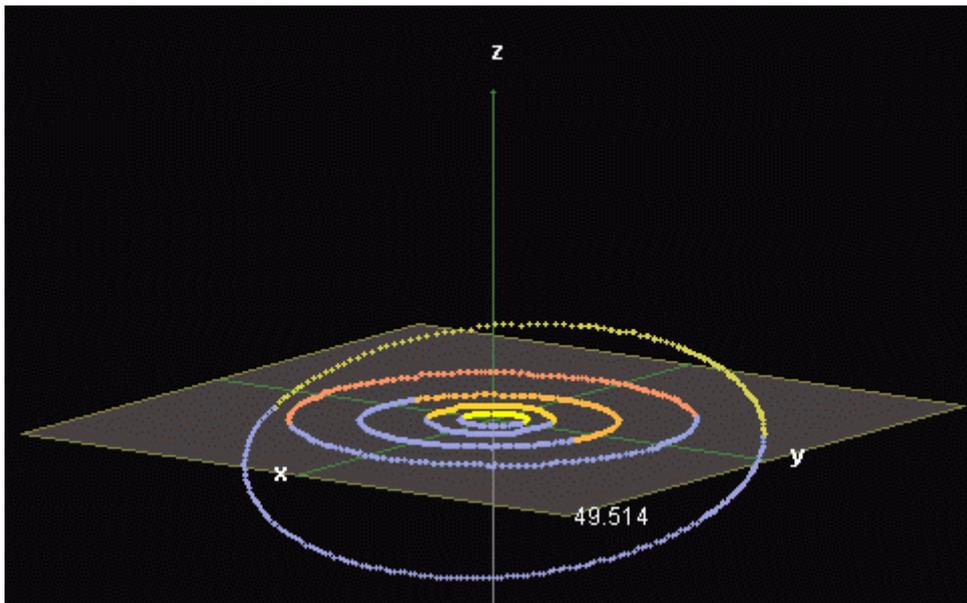


Abbildung 54: Erst die räumliche Darstellung zeigt, daß die vermeintliche Bahnüberschneidung von Neptun und Pluto nur durch die Projektion auf die Ekliptikebene entsteht. Die Pluto-Bahn führt doch deutlich aus der Ekliptikebene heraus und vermeidet dadurch etwaige Kollisionen mit dem wesentlich größeren Nachbarn.

Das Tool „Planet Orbit“ kann über sehr lange Zeiträume die Planetenbahnen wiedergeben. Allerdings sollte man nicht vergessen, daß ihnen die Zeitskala „TT“ unterliegt. Mithin könnte in der weiteren Vergangenheit oder der weiteren Zukunft 12 Uhr „TT“ um etliche Stunden von 12 „UTC“, dem mittleren Mittag, abweichen. Die Untersuchung von historischen Sonnenfinsternissen weist deutlich darauf hin.

Kometenbahn

Kometen stammen entweder noch aus unserem eigenen Sonnensystem (aus dem Kuiper-Gürtel) oder von sehr viel weiter draussen (aus der Oort'schen Wolke). Meist zeichnen sie sich durch extrem exzentrische Bahnen aus, so daß sie meist außerhalb unserer Beobachtungsreichweite liegen. Und wenn sie dann der Sonne näher kommen, werden sie sehr sehr schnell und passieren binnen Wochen mit mehr oder weniger herrlich ausgeprägter Schweifbildung unser Gesichtsfeld.

Sobald ein Komet neu oder wieder gesichtet wird, meist von „Amateur-Kometenjägern“, stehen auch schon erste astrometrische Bahndaten zur Verfügung. Diese gelten meist im raumfesten Ekliptiksystem der Sonne zur Epoche J2000 und können in die Datei „comet.dat“ im Verzeichnis „data“ aufgenommen werden. Dadurch stehen sie auch schon im Tool „Comet Orbit“ zur Verfügung.

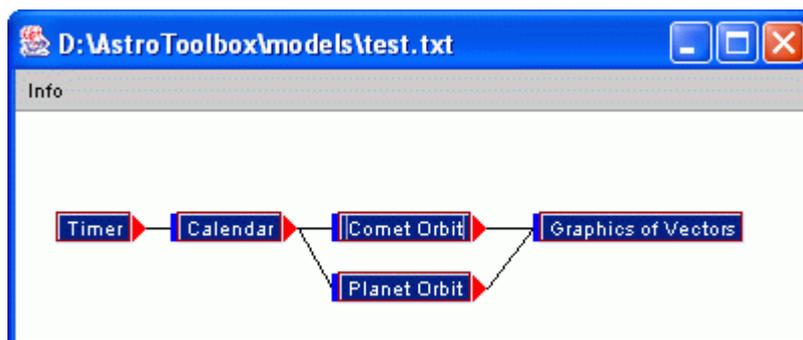


Abbildung 55: Hier soll es im wesentlichen um die Darstellung von Kometenbahnen gehen. Dazu dient das Tool „Comet Orbit“, aus dem wir die gewünschten Objekte auswählen. Damit die relative Position in unserem Sonnensystem besser erkennbar wird, zeichnen wir mit dem Tool „Planet Orbit“ die Bahn des äußeren Planeten Neptun in der Ekliptikebene mit .

Wegen der sehr langen Umlaufzeiten, wählen wir in „Calendar“ das Startdatum 1.1.1900 und lassen die Animation über den Timer in Jahresschritten bis 2050 laufen.

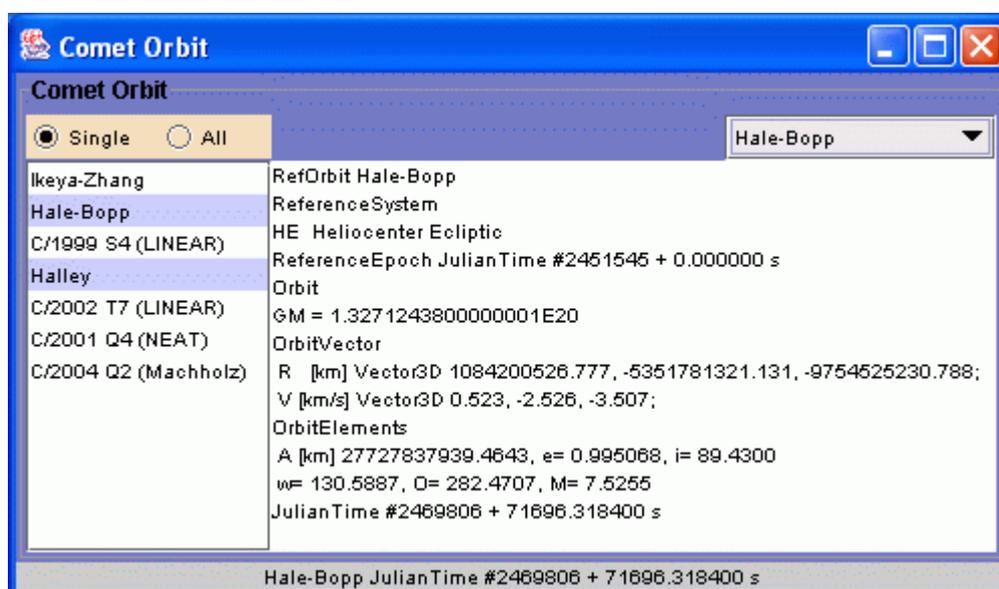


Abbildung 56: Uns interessieren die beiden Kometen Hale-Bopp und Halley, die wir in der Liste links markieren. Hale-Bopp wurde auch rechts ausgewählt, daher erscheinen seine Daten im Fenster und zwar zum letzten Zeitpunkt der Animation (ca. Jahr 2050)

Nach ca. 150 Jahren Modellzeit erhalten wir den gewünschten Bahnverlauf:

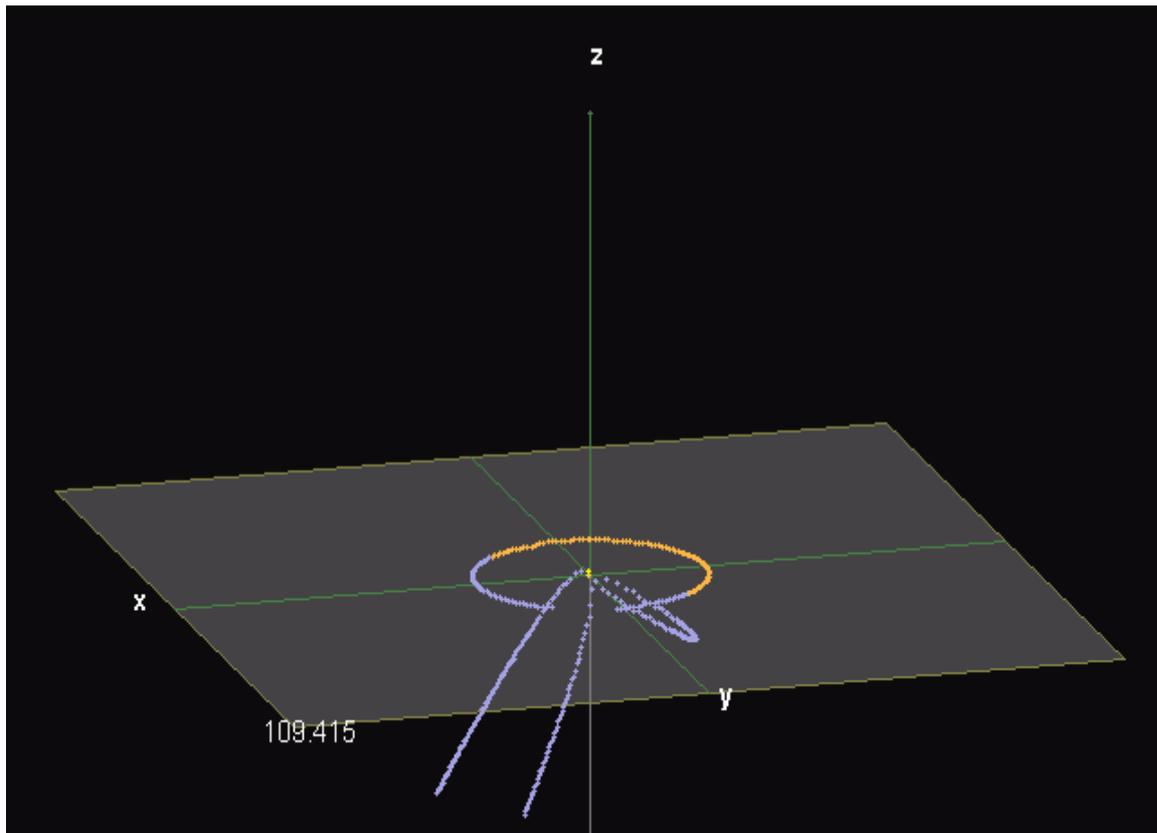


Abbildung 57: 150 Jahre Geschichte eines Teils unseres Sonnensystems werden mit dem Tool „Graphics of Vectors“ visualisiert. In der Ekliptikebene ist der fast vollständige Umlauf des Planeten Neptun zu sehen. Links unten zieht Hale-Bopp seine sehr exzentrische und zudem stark gegenüber der Ekliptik geneigte Bahn. Etwas rechts unterhalb der Neptunbahn hat Halley schon fast zwei Umläufe hinter sich. Auch seine Bahn ist deutlich gegen die Ekliptikebene geneigt. Am besten Sie klicken in die Graphik und ziehen die Maus bei gedrückter linker Maustaste etwas hin und her um einen guten 3D-Eindruck von der Szenerie zu bekommen.

Was man in der Animation noch sehen kann, ist, daß Neptun gegen den Uhrzeigersinn umläuft, während die beiden Kometen dies im Uhrzeigersinn machen. Man spricht hier von retrograder Bewegung.

Wegen der langen Umlaufzeiten ist ein Komet meist nur einmal in einer Generation sichtbar. Daher stellt er etwas Besonderes dar und wird auch mit allem Möglichen mehr oder weniger plausibel in Verbindung gebracht. Seien es Schreckensvisionen oder auch Symbole des Glücks, alles ist zu finden. Dem Astronom Halley gelang es erstmalig, die Wiederkehr eines Kometen vorher zu sagen. Zu seinen Ehren wurde er nach ihm benannt und erfreut etwa alle 84 Jahre seine „Fans“.

Satellitenbahn

Seit im Jahre 1957 der erste künstliche Erdsatellit „Sputnik 1“ vom Weltraum auf die Erde herunter „gepiept“ hatte, stieg eine neue Ära empor. Das Satellitenzeitalter brach an und bescherte uns bis heute viele tausend Satelliten, die alle möglichen Aufgaben erledigen, von der Fernerkundung und Navigation bis zur weltumspannenden Kommunikation. In etwas mehr als einer Stunde umrunden die tieffliegenden Satelliten die ganze Erde, während die GPS-Satelliten dafür einen halben Tag und die geostationären einen ganzen Tag unterwegs sind.

Die Bahnelemente der künstlichen Erdsatelliten ändern sich teils recht kräftig, so daß sie für genaue Berechnungen alle paar Tage erneuert werden sollten. Jeweils die aktuellsten Werte können mit dem Tool „Update Data“ aus der Toolgruppe „Updating“ aus dem Internet auf den lokalen Rechner geladen werden. Und mit dem Tool „TLE Orbit“ können die entsprechenden Orbit-Daten bereitgestellt werden. Das Referenzsystem ist dabei ein raumfestes Äquatorsystem der Erde zur jeweiligen Epoche.

Wir laden das bereits vordefinierte Tool-Modell „satelliteOnEarthMap.txt“ und ergänzen es durch das Tool „Graphics of Vectors“. Da das Tool „Observer Map“ die Input-Vektoren im erdfesten Äquatorsystem erwartet, schalten wir nach „TLE Orbit“ das Tool „Transformation“ ein, dessen Zielsystem mit „EF“ zu vereinbaren ist.

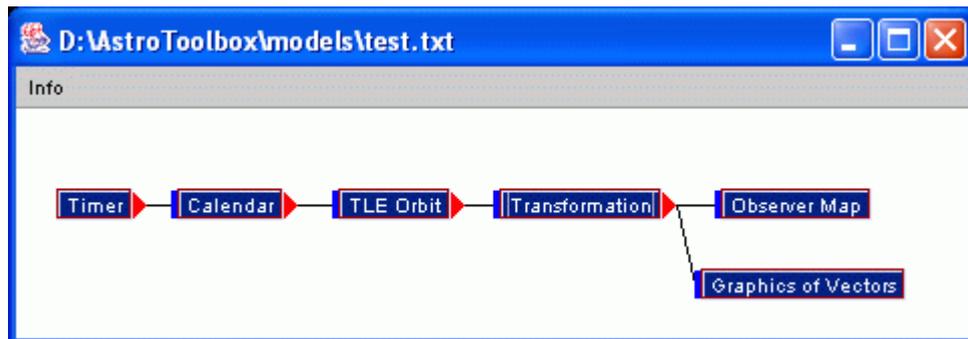


Abbildung 58: Wir stellen verschiedene Satellitenpositionen sowohl auf der Erdkarte (als Projektionen auf die Erdoberfläche) als auch in einer 3D-Ansicht dar. Dazu wählen wir in „Timer“ einen Zeitschritt von 30 Minuten und lassen die Animation etwa einen Tag lang laufen.

Nachdem die „Two Line Elements“ in verschiedene Dateien aufgespalten vorliegen, können wir in „TLE Orbit“ nur jeweils eine davon laden. Wir beginnen mit „geo.txt“, den geostationären Satelliten.

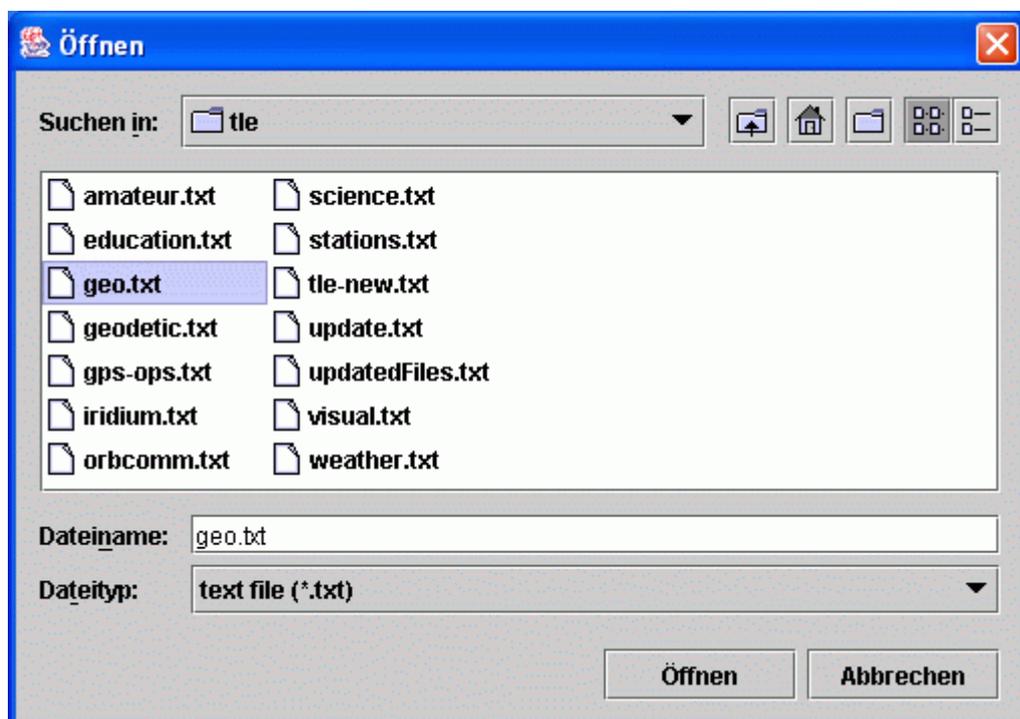


Abbildung 59: Nachdem wir im Tool „TLE Orbit“ den Button „Select Tle-File“ gedrückt haben, erscheint eine File-Auswahl-Box, die es uns erlaubt, eine lokale Datei mit den gewünschten „Two Line Elements“ zu laden. Wir beginnen mit den geostationären Satelliten.

Nach der Tle-File Auswahl werden im Fenster von „TLE Orbit“ die Daten des ersten Satelliten in der Liste angezeigt. Es ist aber auch „All“ markiert, so daß für folgende Zeitpunkte aus „Calendar“ und „Timer“ stets alle verfügbaren Satelliten der Reihe nach gerechnet werden.

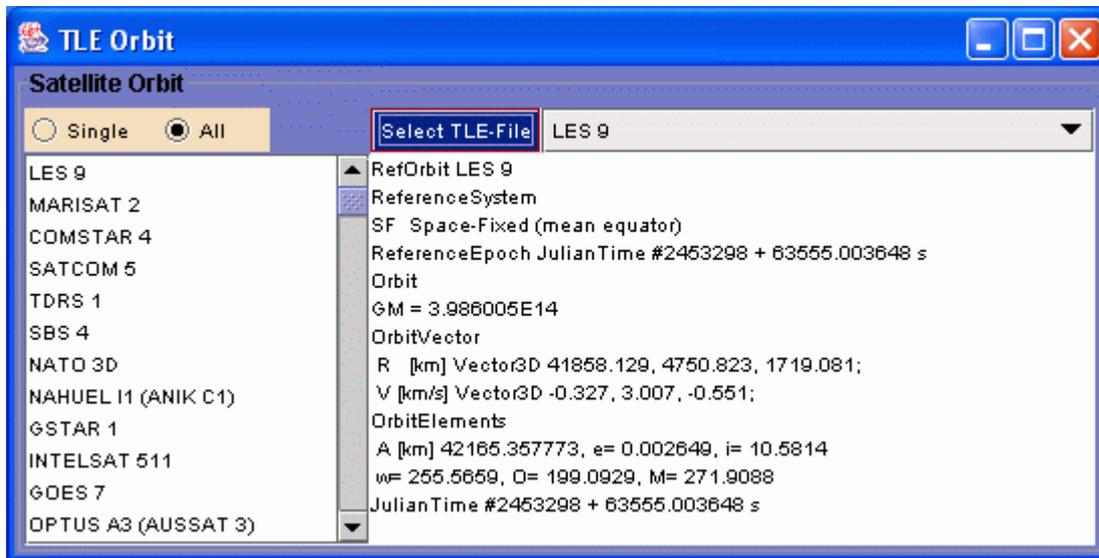


Abbildung 60: Nach dem Laden des Tle-Files „geo.txt“ werden die Daten des ersten Satelliten der Liste präsentiert. Noch stehen die Zeitpunkte auf der Epoche, zu der die Elemente gerechnet worden waren. Sobald aber vom Tool „Calendar“ ein neuer Zeitpunkt übermittelt wird, werden sie angepasst, auch wenn bei der Stellung „All“ die entsprechende Aktualisierung im Fenster unterbleibt (sonst würden der Reihe nach die Daten aller Satelliten angezeigt werden, was für den Betrachter aber so schnell vonstatten ginge, daß er es nicht lesen könnte).

Nun löschen wir vor Start der Animation (30-Minuten-Schritte über einen Tag hinweg) die eventuell bis dato angefallenen Zwischenresultate aus den beiden Graphik-Tools (Menüpunkt Reset – Clear für „Graphics of Vectors“ bzw. einmal in die Erdkarte klicken). Nach dem einen Tag sehen wir die Subsatelliten-Punkte:

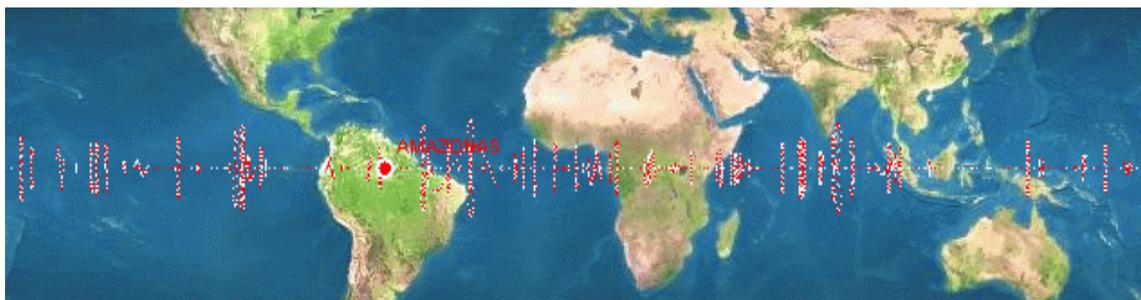


Abbildung 61: Die Subsatellitenpunkte der geostationären Satelliten aus der Datei „geo.txt“ liegen alle entlang des Erdäquators. Diejenigen, die etwas oberhalb oder unterhalb des Äquators beheimatet sind, vollführen eine mehr oder weniger starke „Auf- und Abbewegung“. Der letzte Satellit in der Liste wird immer dick markiert und außerdem auch beschriftet. Ein einziger Mausklick in die Erdkarte löscht alle bis dato angefallenen Markierungen.

Mit Hilfe des Tools „Graphics of Vectors“ können wir uns eine räumliche Ansicht zurechtlegen:

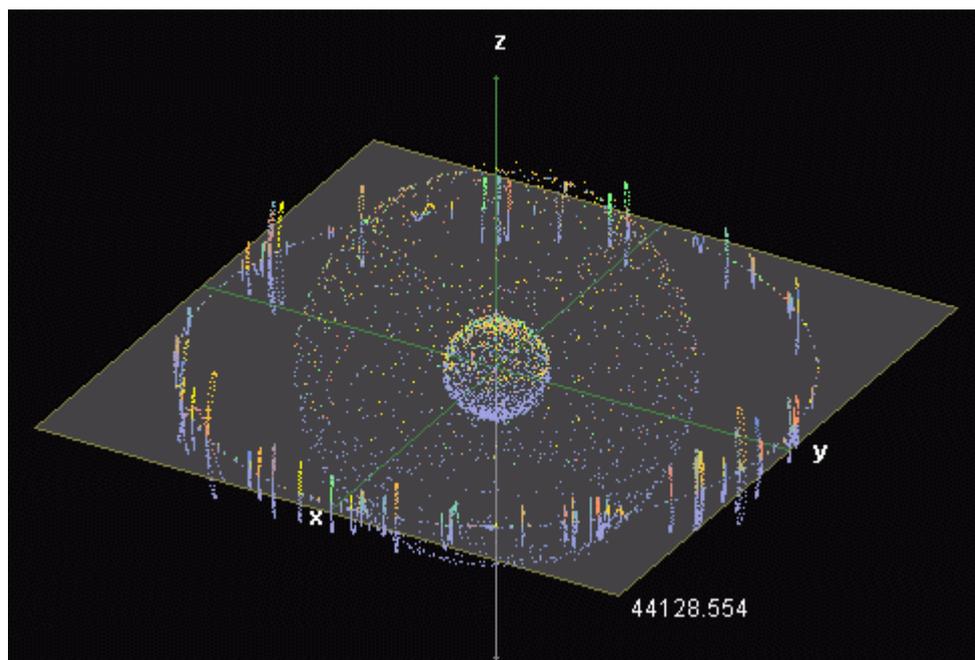


Abbildung 62: Die räumliche Ansicht zeigt deutlich, daß die meisten geostationären Satelliten direkt dem Erdäquator folgen, während einige von ihnen etwas nach oben und unten pendeln. Wegen der Bahnstörungen, die zwangsläufig auftreten, bleibt keiner der Satelliten von sich aus auf dieser idealen Bahn. Alle müssen mehr oder weniger regelmässig nachgesteuert werden, um in ihrem zugewiesenen „Fenster“ zu bleiben.

Wir wählen noch weitere Tle-Files aus, um zu sehen, wie die Erde von den tieffliegenden Satelliten aus „visual.txt“ umhüllt wird. Etwa auf halber Strecke zur geostationären Bahn kreisen die Navigationssatelliten des GPS-Systems („gps-ops.txt“) um die Erde.

Nach der ersten Animation wählen wir einen anderen Tle-File im Tool „TLE Orbit“ aus, nämlich „gps-ops.txt“ und zeichnen für den selben Zeitraum bei gleichem Zeitschritt die Positionen der operationellen GPS-Satelliten ebenfalls in unsere Graphik hinein. Schließlich wiederholen wir das Ganze auch noch für die Satelliten aus der Datei „visual.txt“, die nur wenige hundert Kilometer über der Erdoberfläche ihre Bahnen ziehen und daher meist für das bloße Auge sichtbar sind. Allerdings begrenzen wir die Animation dafür auf etwa 6 Stunden. Das reicht völlig aus um die Erde im Diagramm erkennbar werden zu lassen.

Leider sind nicht mehr alle Satelliten, die jemals ins All geschossen worden sind, nutzbar. Auch befinden sich viele kleine Teile von Trägerraketen oder fehlgeschlagenen Missionen im Orbit. Man spricht zurecht vom Weltraum-Müll, der eine zunehmende Gefahr für weitere Satellitenmissionen birgt. Und Abbildung 62 offenbart nur einen winzigen Ausschnitt davon.

Transformation

Wegen der räumlich getrennten und/oder gegeneinander verdrehten Bezugssysteme sind geeignete Vorschriften zu formulieren, die den Übergang vom einen zum anderen ermöglichen. Diese heißen Transformationen und bestehen aus einer oder mehrerer Translationen und/oder Rotationen. Erstere werden dabei durch Translationsvektoren und letztere durch Rotationsmatrizen dargestellt. Letztlich werden die Koordinaten eines Vektors umgerechnet, so daß sie im neuen Koordinatensystem entweder den selben Vektor beschreiben (bei Rotationen) oder den neuen Vektor zum selben Ziel (bei Translationen).

Translation

Unterscheiden sich zwei Bezugssysteme nur durch ihre Ursprünge, so ist auf jeden Fall der zugehörige Differenzvektor zu ermitteln. Dieser stellt dann den Translationsvektor bereit, mit dessen Hilfe die Transformation vollzogen werden kann. Weisen die beiden Bezugssysteme zudem eine Relativbewegung auf, so ist diese für die Translation der Geschwindigkeitsvektoren heranzuziehen.

Zum Glück genügt meist die Betrachtung folgender Ursprünge:

- Baryzentrum (Massenmittelpunkt des gesamten Sonnensystems)
- Sonne (Heliozentrum)
- Erde (Geozentrum)
- Beobachter (Topozentrum)

Ihre gegenseitige Lagerung ist aber offensichtlich zeitabhängig. Dies sei am Beispiel der Lage des Baryzentrums in Bezug auf die Sonnenmitte veranschaulicht:

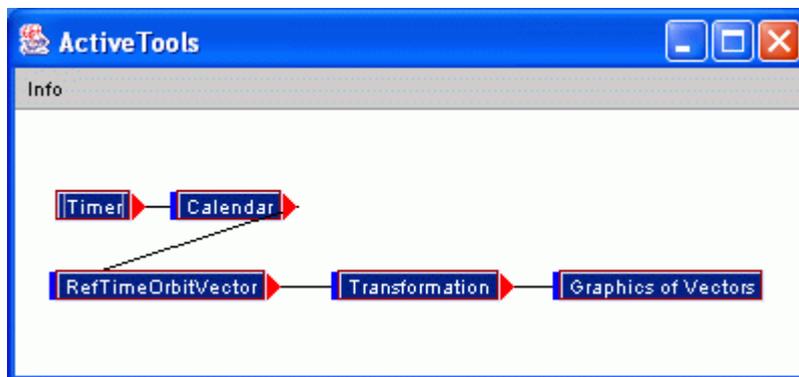


Abbildung 63: Der einfachste Weg, eine Transformation durchzuführen, besteht darin, das gleichnamige Tool aus der gleichnamigen Gruppe einzusetzen. Mit der Kombination „Timer“ und „Calendar“ erzeugen wir, wie gehabt, die entsprechende Animation.

Mit den beiden Tools „Timer“ und „Calendar“ wollen wir den Zeitraum von 1900 bis 2020 in 30-Tages-Schritten durchqueren. Bevor wir die Animation starten, stellen wir in „RefTimeOrbitVector“ das Ausgangssystem „BE – Barycenter Ecliptic“ und in „Transformation“ das Zielsystem „HE – Heliocenter Ecliptic“ ein. „Graphics of Vectors“ steht auf „3D“ und „Points“, sowie „XY-T“. Außerdem löschen wir mit „Reset – Clear“ alle Zwischenresultate.

Am Ende der Animation (Zeitpunkt siehe Abbildung 64) sehen wir die Bahnkurve des Baryzentrums relativ zur Sonnenmitte (Abbildung 66).

Erwartungsgemäß liegt das Baryzentrum meist in der Ekliptikebene, daher macht die zeitliche Entzerrung der x-y-Ebene Sinn. Die maximale Abweichung vom Heliozentrum liegt bei fast 0.01 Astronomischen Einheiten, also etwa 1,5 Millionen Kilometern und das ist doch schon deutlich außerhalb des Sonnenkörpers. Die erkennbare Hauptperiode wird im Wesentlichen durch den Planeten Jupiter hervorgerufen.

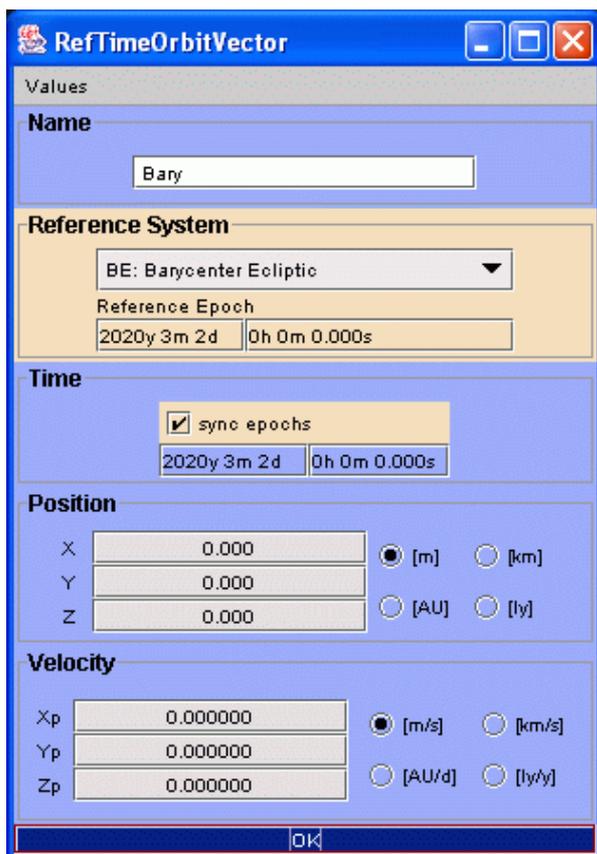


Abbildung 64: Im Ausgangssystem „BE“ lauten die Komponenten des Baryzentrums einfach alle nur Null.

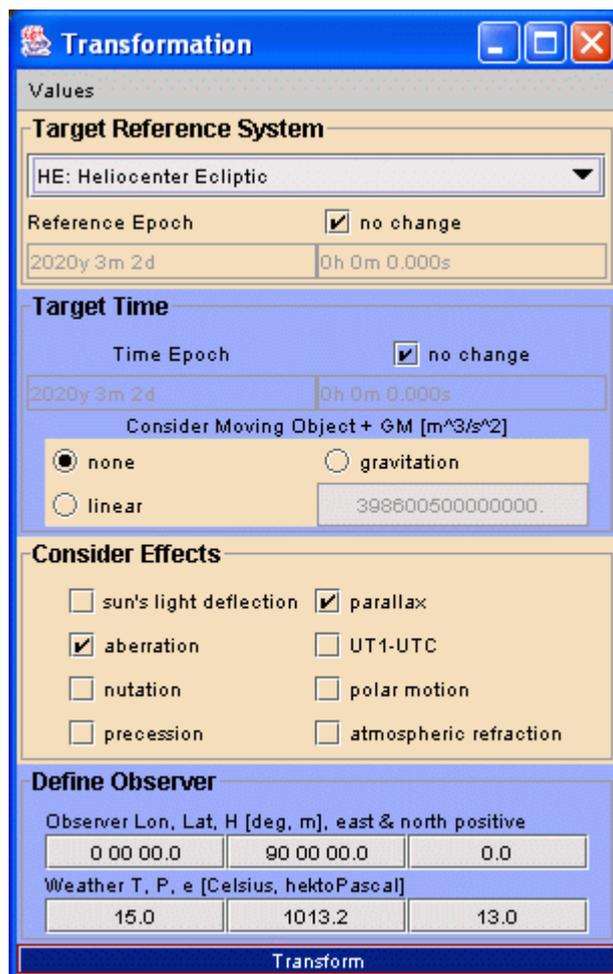


Abbildung 65: Mit dem Zielsystem „HE“ wird der Nullvektor des baryzentrischen Eklptiksystems in das heliozentrische Eklptiksystem überführt. „parallax“ muß abgehakt sein, damit die Translation auch tatsächlich Wirkung zeigt.

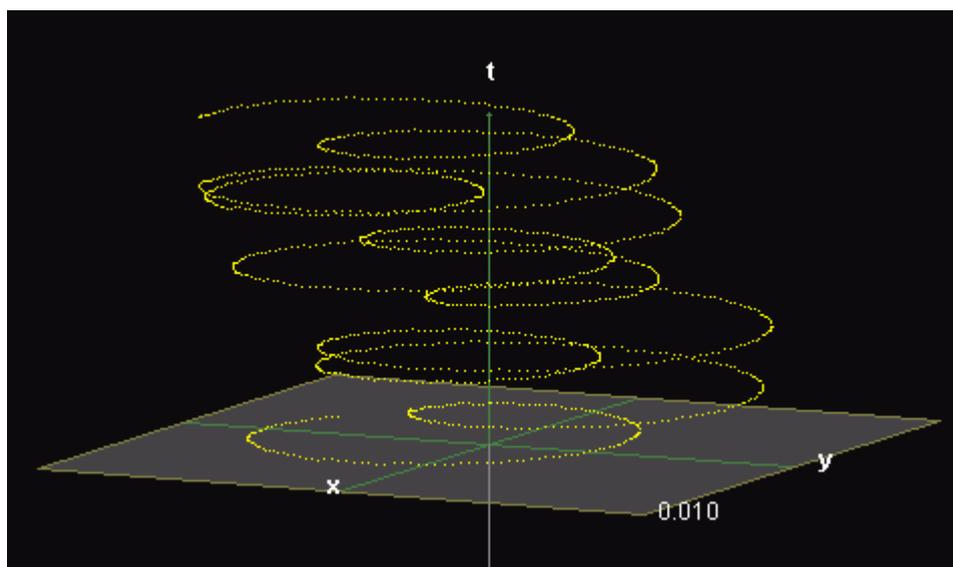


Abbildung 66: Die Bewegung des Baryzentrums relativ zum Heliocentrum im Zeitraum 1900 (unten) bis 2020 (oben). Die hellgraue Ebene repräsentiert die Eklptikebene, x zeigt zum Frühlingspunkt

Da die Erde um die Sonne (genauer gesagt, um das Baryzentrum) kreist, spielt bei der entsprechenden Translation die Erdbahn die entscheidende Rolle. Sie unterscheidet sich nicht wesentlich von den in Abbildung 53 und Abbildung 54 dargestellten Planetenbahnen, außer, daß sie näher an der Sonne liegt.

Bleiben noch die Beobachtungsorte, die sich relativ zum Geozentrum auf den entsprechenden Breitenkreisen um die Polachse bewegen. Sie können leicht mit folgender Schaltung ermittelt werden:

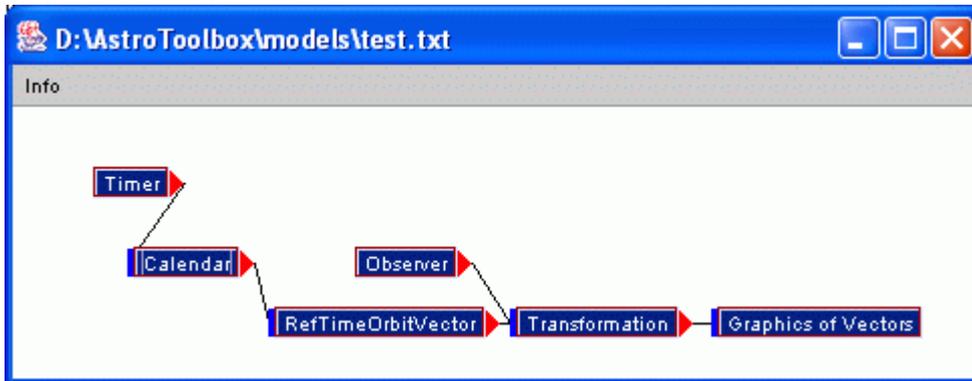


Abbildung 67: Um die relativen Positionen von Beobachtungsorten auf der Erdoberfläche im raumfesten Äquatorsystem darzustellen, fügen wir das Tool „Observer“ hinzu. In „RefTimeOrbitVector“ vereinbaren wir das Ausgangssystem „TH“ und in „Transformation“ das Zielsystem „SF“.

Der Reihe nach stellen wir im Tool „Observer“ die Breiten 60, 30 , und 0 ein und lassen die Animation jeweils einen Sterntag lang im 30-Minuten-Takt laufen.

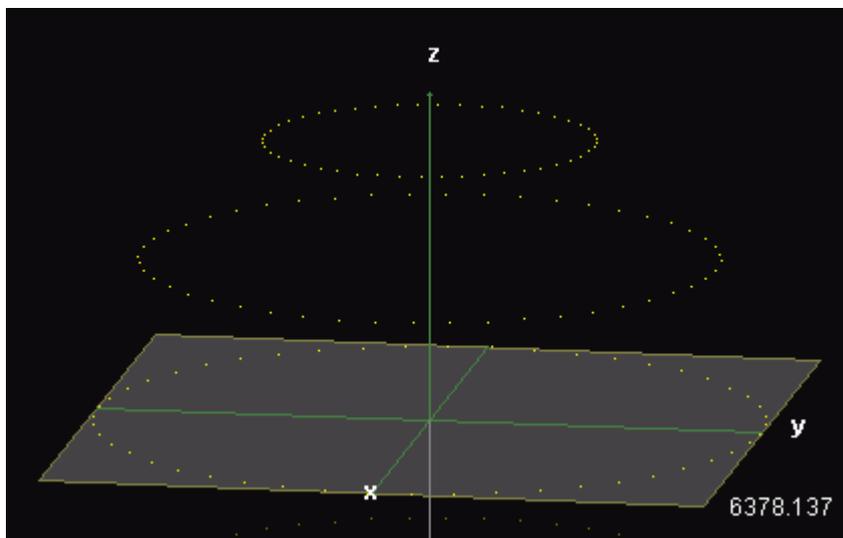


Abbildung 68: Die Breitenkreise für 60, 30, und 0 Grad entstanden durch jeweils einen fiktiven Beobachter, der auf diese Breiten gesetzt und dann einen Sterntag lang im 30-Minuten-Takt im raumfesten System markiert wurde. Dazu wurde im Tool „Timer“ „sid“ anstelle von „sol“ aktiviert.

Rotation

Wenn zwei Bezugssysteme zwar den gleichen Ursprung haben, jedoch gegen einander verdreht sind, die Koordinatenachsen also in verschiedene Richtungen zeigen, kann durch maximal drei Drehungen um die Koordinatenachsen das eine in das andere überführt werden. Und dadurch können die Komponenten sowohl eines Orts-, als auch eines Geschwindigkeitsvektors transformiert werden. Befinden sich die Bezugssysteme in relativer rotatorischer Bewegung zu einander, so ist die resultierende Rotationsmatrix (das Matrixprodukt der einzelnen) zeitabhängig. Zur Geschwindigkeit kommen dann auch noch Anteile aus der gegenseitigen Rotationsbewegung hinzu.

Die wichtigsten Rotationen beschreiben Übergänge zwischen

- Ekliptik- und Äquatorsystem (Ekliptikschiefe)
- Äquatorsystemen zu verschiedenen Epochen (3 Präzessionswinkel)
- mittlerem und wahren Äquatorsystem (2 Nutationswinkel)
- raumfestem und erdfestem Äquatorsystem (GAST oder GMST, Sternzeitwinkel)
- erdfestem Äquator- und Horizontsystem (geographische Länge und Breite)

Ein paar davon wollen wir uns näher ansehen. Der Schaltplan entspricht dem aus Abbildung 63, nur daß Ausgangs- und Zielsystem entsprechend angepasst werden müssen. Ebenso sind die Zeitdauer und der Zeitschritt passend zu wählen.

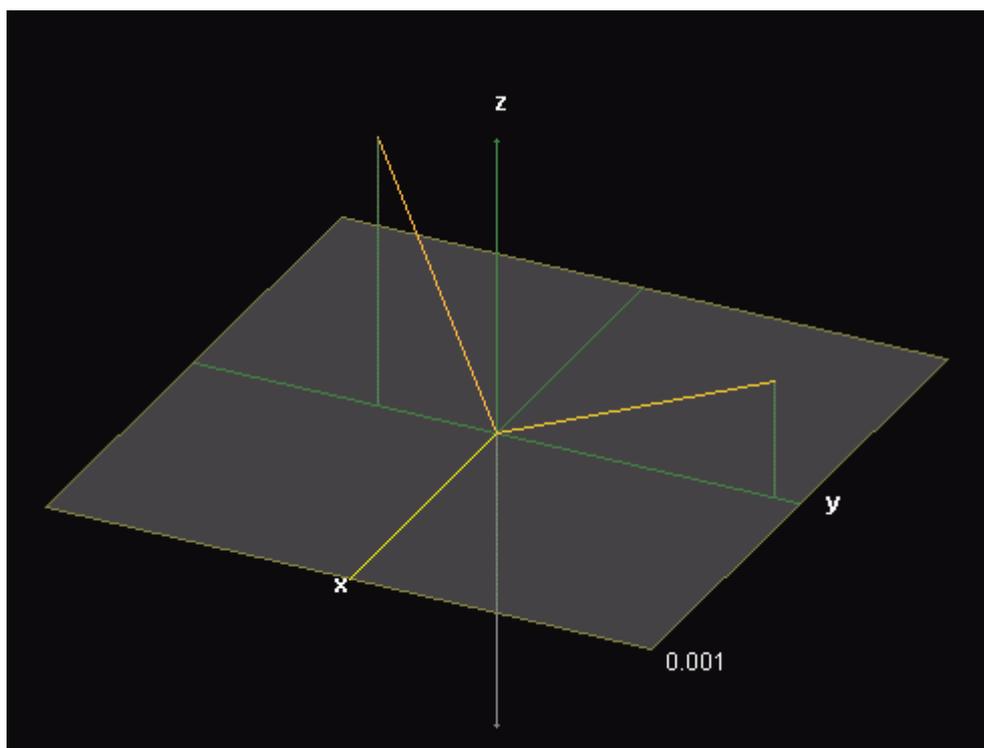


Abbildung 69: Werden die Einheitsvektoren im Ekliptiksystem vereinbart („GE“ in Tool „RefTimeOrbitVector“) und dann ins Äquatorsystem transformiert („SF“ in Tool „Transformation“), dann ergibt sich dieses Bild. Die graue Fläche entspricht dabei der Äquatorebene. Die Rotation erfolgt um die x-Achse, daher bleibt diese erhalten, und y- bzw. z-Achsen schliessen jeweils den Winkel der Ekliptikschiefe ein.

In der Ekliptikebene laufen die Planeten um die Sonne, daher bleibt das Ekliptiksystem die erste Wahl, wenn es um deren Bahnbeschreibungen geht. Wann immer aber Positionen relativ zur Erde ermittelt werden sollen, steht das Äquatorsystem im Vordergrund.

Schließlich steht der Rotationspol der Erde senkrecht auf der Äquatorebene. Und wenn ein erdebundener Beobachter mit ins Spiel kommt, ist die Horizontebene die natürlich erkennbare Bezugsfläche.

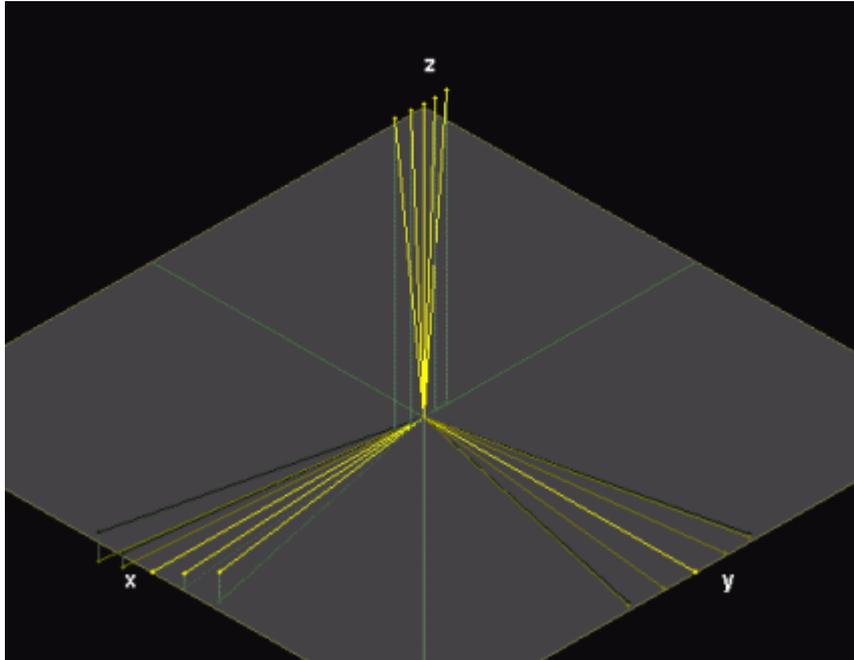


Abbildung 70: Der Ausschnitt aus dem Tool „Graphics of Vectors“ zeigt die Koordinatenachsen der raumfesten Äquatorsysteme zu den Epochen 1000, 1500 (rechts), heute (mitte) und 2500 und 3000 (links). Der Drehsinn um die z-Achse ist also im Uhrzeigersinn.

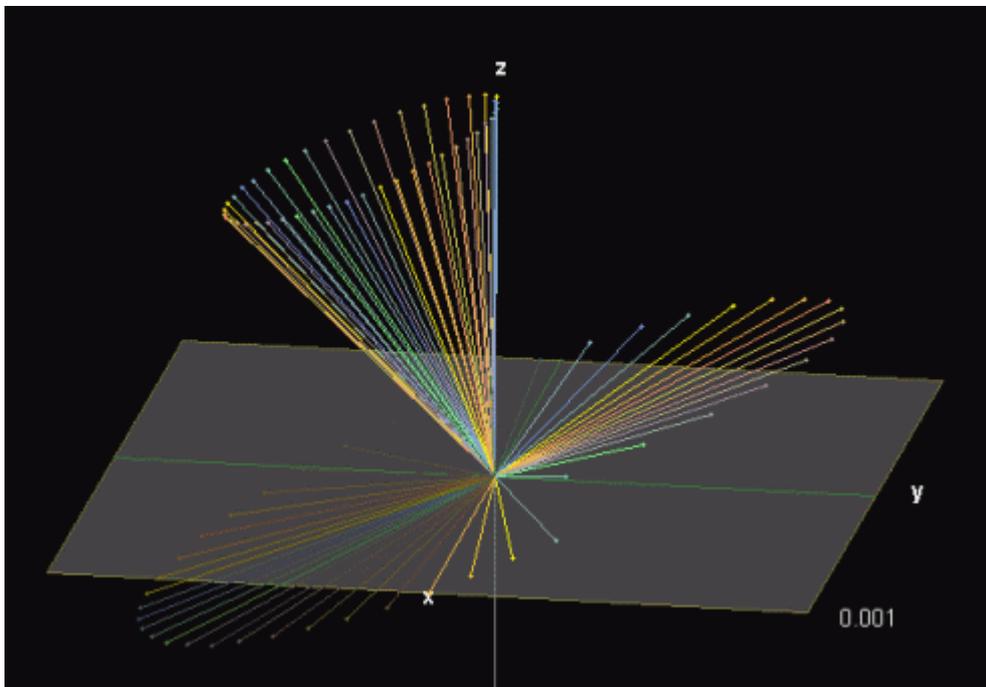


Abbildung 71: In knapp 26000 Jahren bildet sich ein Präzessionskegel heraus, dem die z-Achse im Uhrzeigersinn folgt. Die x-Achse beschreibt während dieser Zeit recht gut die Ekliptikebene. Um dieses Bild zu gewinnen, müssen „RefTimeOrbitVector“ und „Transformation“ auf „SF“ eingestellt werden und es müssen in „Transformation“ die Häkchen vor „no change“ entfernt werden. Daneben ist die Zielepoche (sowohl Referenzeпоche als auch Zeitepoche) auf „J2000“ zu setzen. Das heisst, daß die graue Ebene die Äquatorebene zur Epoche J2000 widerspiegelt.

Leider sind die sogenannten raumfesten Bezugssysteme nicht wirklich raumfest, denn die x-Achse, als Schnittgerade von Ekliptik- und Äquatorebene, schwankt ausreichend hin und her, um diese Illusion wie eine Seifenblase zerplatzen zu lassen.

Für einen noch längeren Zeitraum erhalten wir einen kompletten Umlauf. Wegen der besseren Übersichtlichkeit sind aber nur die z- und die x-Achse eingezeichnet worden.

Daß das Topozentrum nicht mit dem Geozentrum übereinstimmt, haben wir bereits im Abschnitt „Translation“ gesehen. Zudem sind aber das Äquator- und das Horizontsystem gegeneinander verdreht.

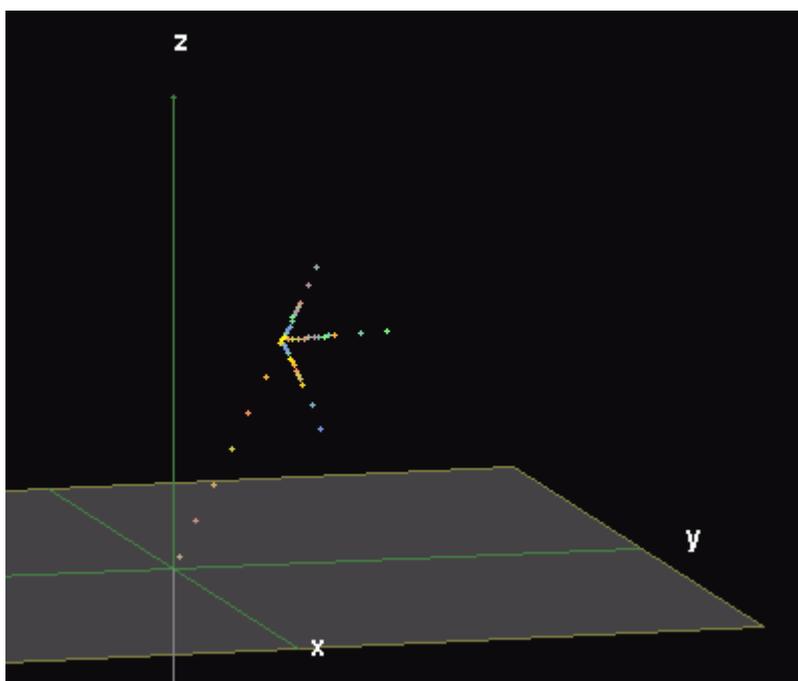


Abbildung 72: Die Lage des topozentrischen Horizontsystems relativ zum erdfesten Äquatorsystem. Zunächst fällt die räumliche Versetzung vom Geozentrum ins Topozentrum auf und dann die verdrehte Orientierung der Koordinatenachsen (x_{topo} zeigt nach Süden, hier fast in Richtung der positiven Spitze der x-Achse, y_{topo} zeigt nach Osten und z_{topo} zum Zenit). Die Transformation erfolgte mit dem topozentrischen Nullvektor eines Beobachtungsortes (hier München) vom Horizontsystem des Beobachters in das erdfeste Äquatorsystem. Danach wurden in kleinen Schritten die drei Achsen einzeln erhöht um die topozentrische x-, y- und z-Achse zu erhalten. Um die Verbindung zum Geozentrum herzustellen, wurde die z-Achse in 1000 km – Schritten bis minus 6000 km reduziert.

Somit wäre unser „Ausflug“ ins Land der Transformationen beendet. Statt des einzelnen Tools „Transformation“, das all die für uns relevanten Übergänge beherrscht, hätten wir natürlich auch die Einzeltools aus den Tool-Gruppen „Translation“ und „Rotation“ heranziehen und kombinieren können.

Korrekturen

Leider sind die Verhältnisse in unserer Welt nicht ganz so einfach wie im vorigen Kapitel dargestellt. Positionsastonomie befasst sich mit Positionen von Himmelskörpern, bzw. allein deren Richtungen, wenn die Entfernung nicht ohne weiteres bestimmt werden kann. Und alle Richtungen, die wir beobachten, sind durch das Licht bestimmt, das die Himmelskörpern zu uns schicken. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um sichtbares Licht, um Radiowellen oder Röntgenstrahlen handelt. Alle folgen im Raum-Zeit-Kontinuum so-

nannten „Geodäten“, den kürzestmöglichen Verbindungen im Universum. Wäre es eben, so wären die „Geodäten“ Gerade. Ist es aber gekrümmt, so wird der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ebenfalls durch eine gekrümmte Kurve gebildet. Seit Einstein's Allgemeiner Relativitätstheorie ist es klar, daß die Krümmung der Raum-Zeit durch die in ihr enthaltenen Massen und Energien hervorgerufen wird.

Lichtablenkung wegen der Sonne

Zwar ist die Sonne nicht übermäßig massereich im Vergleich zu anderen Objekten im Universum. Dennoch führt sie zu einer deutlichen Lichtablenkung, insbesondere dann, wenn der schwache Lichtstrahl eines fernen Objektes die Sonnenoberfläche „streift“. Von Einstein bereits im Jahre 1915 vorhergesagt, wurde sie von Eddington schon im Jahre 1919 durch Messungen während der damaligen totalen Sonnenfinsternis bestätigt. Dabei ging es nur um etwa 1,75 Bogensekunden, die nachzuweisen waren. Diese geringe Winkeldistanz entspricht der Hälfte des Durchmessers eines Euro-Cent-Stückes in einer Entfernung von einem Kilometer.

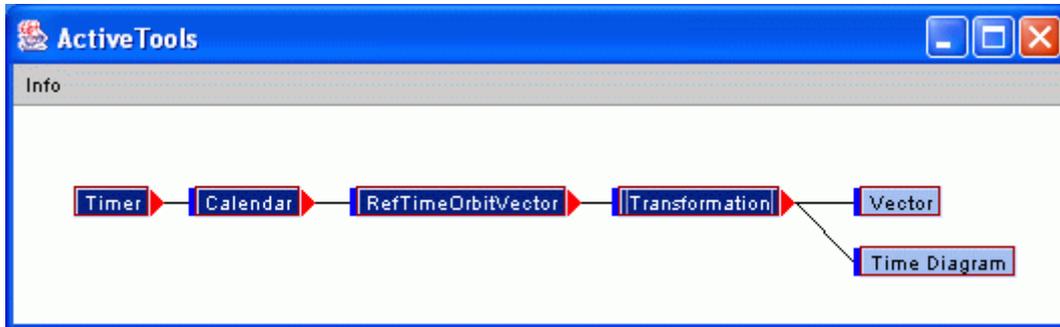


Abbildung 73: Um die Gravitationslichtablenkung, die von der Sonne verursacht wird, zu bestimmen, entwerfen wir dieses Schaltbild. Während eines Jahres überprüfen wir die Richtung zum Frühlingspunkt, in dem wir sie vom raumfesten ins raumfeste Äquatorsystem unter Berücksichtigung der „sun's light deflection“ im Tool „Transformation“ transformieren.

Im Tool „RefTimeOrbitVector“ definieren wir die Ausgangsrichtung wie folgt:

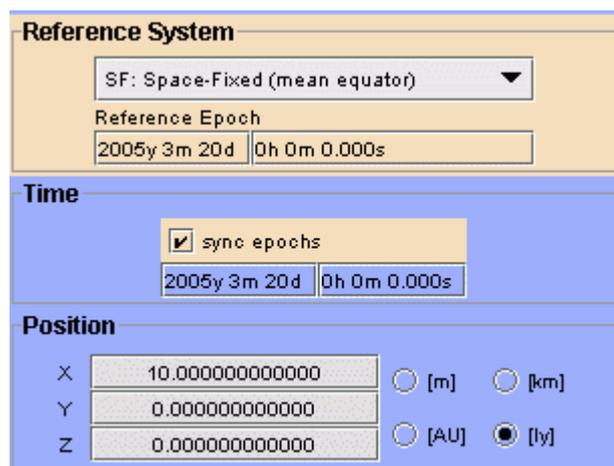


Abbildung 74: Unsere Ausgangsrichtung weist zum Frühlingspunkt in 10 Lichtjahren Entfernung.

Und diese wird in das gleiche System, nämlich das raumfeste Äquatorsystem zur selben Epoche transformiert. Allerdings ist der uns interessierende Effekt abgehakt:

Target Reference System

SF: Space-Fixed (mean equator) ▼

Reference Epoch no change

2005y 3m 20d | 0h 0m 0.000s

Target Time

Time Epoch no change

2005y 3m 20d | 0h 0m 0.000s

Consider Moving Object + GM [m³/s²]

none gravitation

linear 3986005000000000.

Consider Effects

sun's light deflection parallax

aberration UT1-UTC

Abbildung 75: Im Tool „Transformation“ wurde der uns interessierende Effekt, die Lichtablenkung wegen der Sonnengravitation, aktiviert. Das Referenzsystem selbst bleibt gleich.

Nun starten wir die Animation am 1. Januar 2005, 0 Uhr und lassen sie bis zum Juni in 1-Tages-Schritten laufen (vorher haben wir schon irgendwelche Zwischenresultate in „Time Diagram“ gelöscht). Den Betrag der Winkelabweichung in Rektaszension erfahren wir aus unserem Graphik-Tool.



Abbildung 76: „Time Diagram“ zeigt die Winkelabweichung des Richtungsvektors zum Frühlingspunkt, die erwartungsgemäß am Frühlingsanfang, wenn die Sonne „vorbeikommt“, am Größten wird. Die vertikale Achse umfasst hier 0.84 Bogensekunden, die wir aber erst dem Tool „Vector“ entnehmen können, denn hier ist die Einheit in Grad angegeben.

Deutlich erkennbar wird der „Aus Schlag“ der Lichtablenkung, wenn die Sonne in die Nähe des Frühlingspunktes wandert. Da die Zeitpunkte jeweils um 0 Uhr gewählt wurden, kommt der Frühlingspunkt nicht genügend nah an den Sonnenrand um die klassischen 1,75 Bogensekunden herauszulösen. Aber wenn Sie am 20.3. kleinere Schritte von einer Stunde wählen, kann die Distanz zur Sonnenmitte auch kleiner als ein viertel Grad und die Lichtablenkung größer als 1,75 Bogensekunden werden. Das ist zwar in der Realität nicht möglich, da der Lichtstrahl ja von der Sonne abgeblockt würde, aber in der Simulation lassen sich auf diese Art und Weise auch solche Situationen erforschen.

Dem Tool „Vector“ entnehmen wir die genauen Zahlenwerte für den 20.3.2005, 0 Uhr.

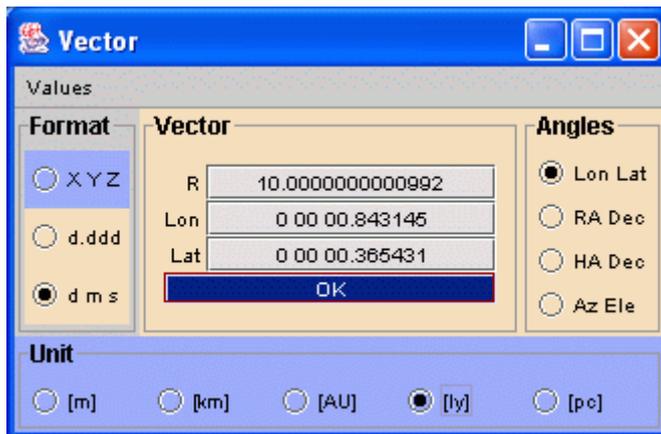


Abbildung 77: Am 20. März 2005 um 0 Uhr beträgt die Abweichung der Richtung zum Frühlingspunkt 0.8 Bogensekunden in Rektaszension und 0.3 Bogensekunden in Deklination. Diese Ablenkung ist allein der Gravitation der Sonne zu verdanken. Selbst 3 Monate vorher oder nachher (entsprechend je 90 Grad Winkeldistanz der Beobachtungsrichtung zur Sonne) beträgt sie noch etwa 5 Millibogensekunden. Bedenkt man die hohe Meßgenauigkeit von weniger als einer Millibogensekunde bei VLBI (Very Long Baseline Interferometry), so wird schnell klar, daß dieser Effekt nicht nur in Sonnennähe bedeutsam wird.

Aberration

Ein Effekt, der wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes resultiert, heißt Aberration. Gemeint ist die Ablenkung des Lichtes wegen eines bewegten Beobachters oder wegen eines bewegten Zieles. Oft wird nur die erste Variante tatsächlich als Aberration bezeichnet und die zweite als Lichtzeitkorrektur. Letztlich ist aber die Relativgeschwindigkeit, ermittelt in einem Inertialsystem, ausschlaggebend, so daß nicht zwischen beiden unterschieden werden muß.

Wir kennen den prinzipiellen Effekt aus unserem Alltagsleben. Wenn wir im Regen spazieren gehen, halten wir den Regenschirm stets ein wenig nach vorne, weil die Regentropfen von vorne, also aus der Richtung, in der wir uns bewegen, zu kommen scheinen. Und wenn wir stehen bleiben, fallen sie wieder völlig senkrecht nach unten.

Wenn also analog dazu Licht senkrecht einfällt und wir uns bewegen, scheint das Licht aus der Richtung zu kommen, in die wir uns bewegen. Denken wir dabei an Lichtteilchen, an Photonen also, so wird die Analogie zu den Regenteilchen, den Regentropfen, noch klarer.

Da wir uns im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit meist sehr sehr langsam bewegen, ist der Effekt auch sehr sehr klein. Bedenken wir aber, daß die Erde mit etwa 30 km pro Sekunde um die Sonne kreist, so macht das schon etwa 20 Bogensekunden aus und die liegen weit über unserer Beobachtungsgenauigkeit.

Zur Berechnung verwenden wir den selben Schaltplan wie gerade eben (Lichtablenkung wegen der Sonnengravitation), nur daß Ausgangs- und Zielsystem anders und der Effekt „Aberration“ gewählt werden.

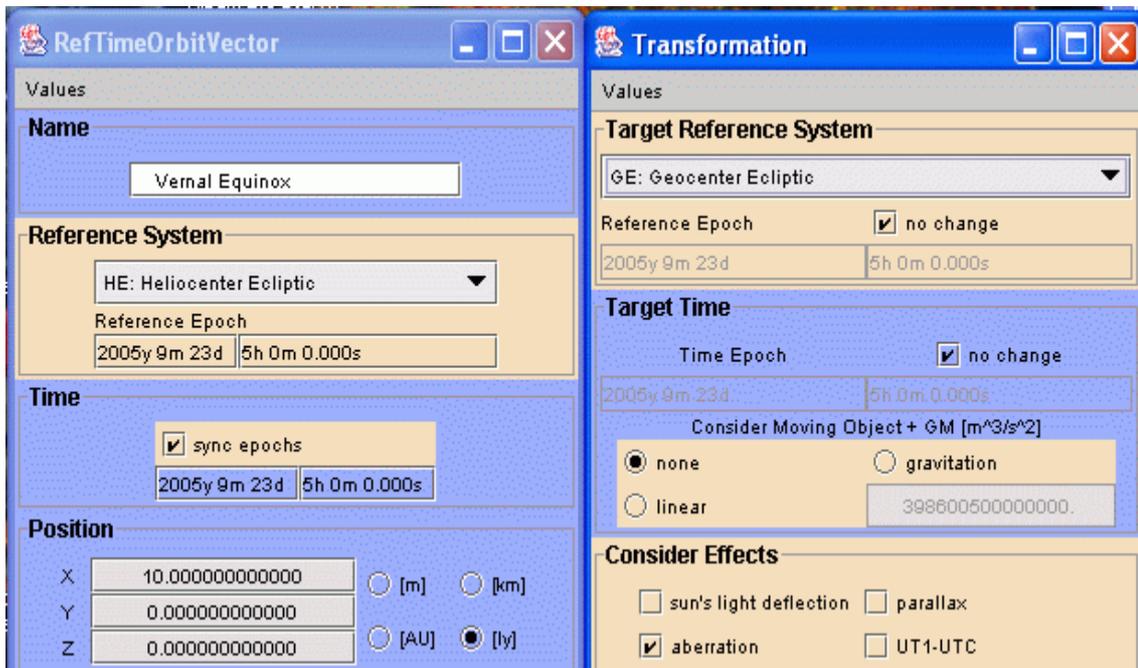


Abbildung 78: Wir transformieren die Richtung zum Frühlingspunkt vom heliozentrischen ins geozentrische Ekliptiksystem unter Berücksichtigung der „aberration“. Bei diesem Übergang kommt die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne (30 km/s) zum Tragen.

Betrachten wir nun den Zeitraum von Ende Juni 2005 bis Anfang Dezember 2005.

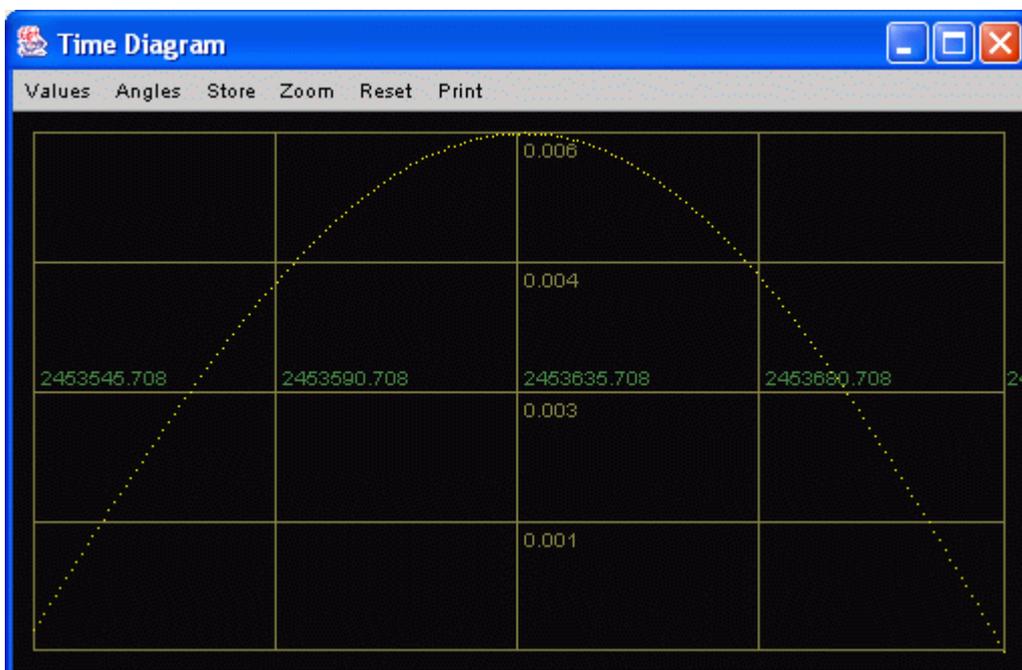


Abbildung 79: Von Juni bis Dezember 2005 sehen wir den Einfluß der Lichtaberration sehr deutlich. Das Maximum liegt bei etwa 20 Bogensekunden in der Mitte, also um den Zeitraum des Herbstanfangs, wenn nämlich die Geschwindigkeit der Erde gerade senkrecht zur Richtung zum Frühlingspunkt verläuft.

Um den Sommer- und den Winteranfang (links und rechts im Bild) bewegt sich die Erde in oder gegen die Richtung zum Frühlingspunkt, daher ist die Lichtaberration nahezu Null. Um den Herbstanfang allerdings beträgt dieser Winkel etwa 90 Grad, so daß der Effekt maximal ausfällt.

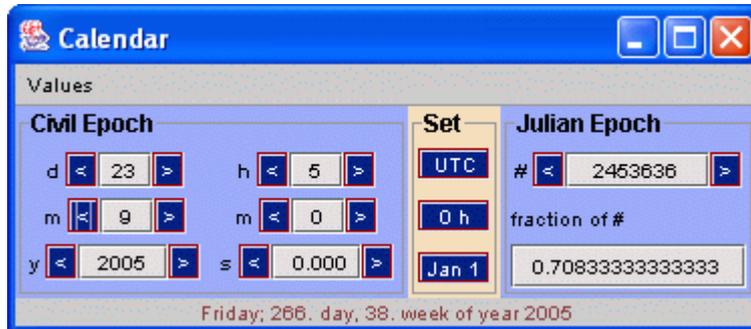


Abbildung 80: Am 23. September 2005 um 5 Uhr UTC bilden die Bewegungsrichtung der Erde um die Sonne und der Richtung zum Frühlingspunkt einen rechten Winkel.

Also betrachten wir zum Zeitpunkt aus Abbildung 80 die Abweichung der beobachteten Richtung in Länge

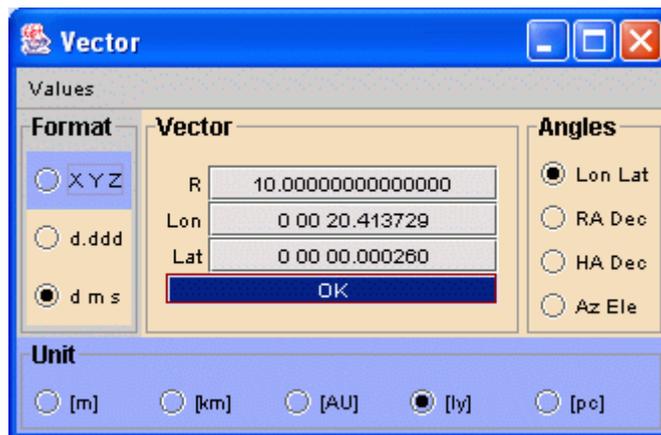


Abbildung 81: Am 23. September 2005 um 5 Uhr beträgt die Abweichung der Richtung zum Frühlingspunkt 20.4 Bogensekunden in Länge. Diese Ablenkung ist allein der bewegten Erde zu verdanken.

um einen Wert von über 20 Bogensekunden abzulesen. Für Planeten oder Kometen, die sich relativ zur Erde noch wesentlich schneller als 30 km/s bewegen können, fällt die Aberration dann entsprechend wesentlich höher aus.

Refraktion

Aus dem Bereich der Optik ist die Brechung des Lichtes schon länger bekannt. Beim Übergang vom optisch dünneren ins optisch dichtere Medium wird dabei ein schräg einfallender Lichtstrahl zum Lot auf die Eintrittsfläche hin gebrochen. Generell ändert Licht seine Ausbreitungsrichtung stets dann, wenn es bei schrägem Einfallswinkel in Bereiche kommt, in denen es seine effektive Geschwindigkeit verändert. Und diese hängt wiederum vom Brechungsindex des durchlaufenen Materials ab.

Da unsere Atmosphäre auf jeden Fall optisch dichter als das Vakuum ist, kann dieser Effekt bei der Beobachtung von Himmelskörpern nicht ausbleiben. Erschwerend kommt hinzu, daß die Atmosphäre im allgemeinen um so dichter ist, je näher sie an der Erdoberfläche liegt. Nun ist aber der exakte Aufbau der Atmosphäre entlang des Strahlwegs gar nicht bekannt. Daher wird auf Atmosphärenmodelle zurückgegriffen, die allein durch die Wetterdaten am Beobachtungsort bestimmt sind. Die Summe der Forschungen auf diesem Gebiet münden schließlich in sogenannte Refraktionsformeln ein, die im Mittel sehr gute Ergebnisse liefern.

Mit dem Schaltbild

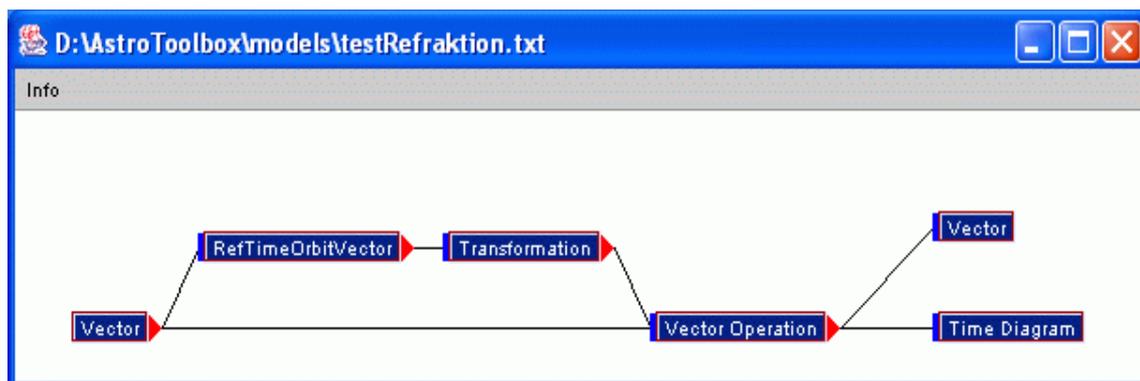


Abbildung 82: Um die Lichtkrümmung in der Atmosphäre zu bestimmen stellen wir im Tool „Vector“, ganz links, verschiedene Elevationen ein. Dann transformieren wir diesen topozentrischen Vektor vom System „TH – Topocenter Horizon“ in eben dieses unter Berücksichtigung der Refraktion. Mit „Vector Operation“ ermitteln wir die Winkeldifferenz zwischen dem transformierten und dem Originalvektor. Den Unterschied in Elevation können wir im rechten Tool „Vector“ als Zahlenwert ablesen oder in „Time Diagram“ als Punkt in einer Graphik markieren.

wollen wir den Refraktionseinfluß unserer Atmosphäre untersuchen. Dazu tragen wir der Reihe nach im linken „Vector“-Tool die Elevationen 10 bis 90 Grad in Schritten von 10 Grad ein. Sowohl in „RefTimeOrbitVector“, als auch in „Transformation“ stellen wir das topozentrische Horizontsystem („TH“) ein. Den einzig wirksamen Einfluß markieren wir im Tool „Transformation“.

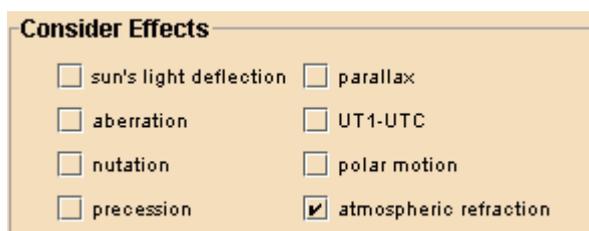


Abbildung 83: Da „atmospheric refraction“ abgehakt ist, wird bei der Transformation die Krümmung des Lichtes in der Atmosphäre berücksichtigt.

Um den Einfluß selbst klar herauszustellen, bilden wir dann die Winkeldifferenz zum Originalvektor

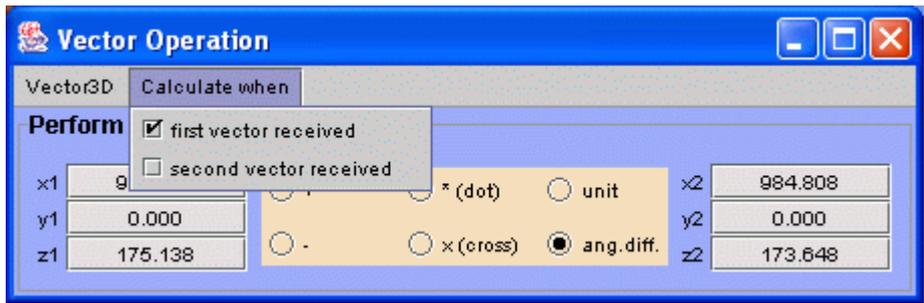


Abbildung 84: Das Tool „Vector Operation“ erlaubt es uns, zwei Eingabevektoren miteinander zu verknüpfen. Eine dieser Verknüpfungen ist die Bildung der Differenzwinkel der beiden Vektoren („ang.diff.“) und das ist hier für uns von Interesse. Wir können nämlich damit direkt den Einfluß einer Transformation ermitteln, wenn sowohl der Originalvektor, als auch der transformierte Vektor die Operanden repräsentieren. Damit das Ergebnis nicht zweimal abgeliefert wird, lassen wir die Berechnung nur dann durchführen, wenn einer der beiden Vektoren erneuert worden ist. Welcher das ist, hängt davon ab, in welcher Reihenfolge wir die Tool-Verknüpfungen erstellt haben und ob wir über den Menüpunkt „Vector3D“ die beiden Eingabevektoren vertauscht haben. Wir stellen die Dinge so ein, daß der Elevationsunterschied positiv wird.

und zeigen sie für alle Werte (10...90 Grad) in „Time Diagram“ an.

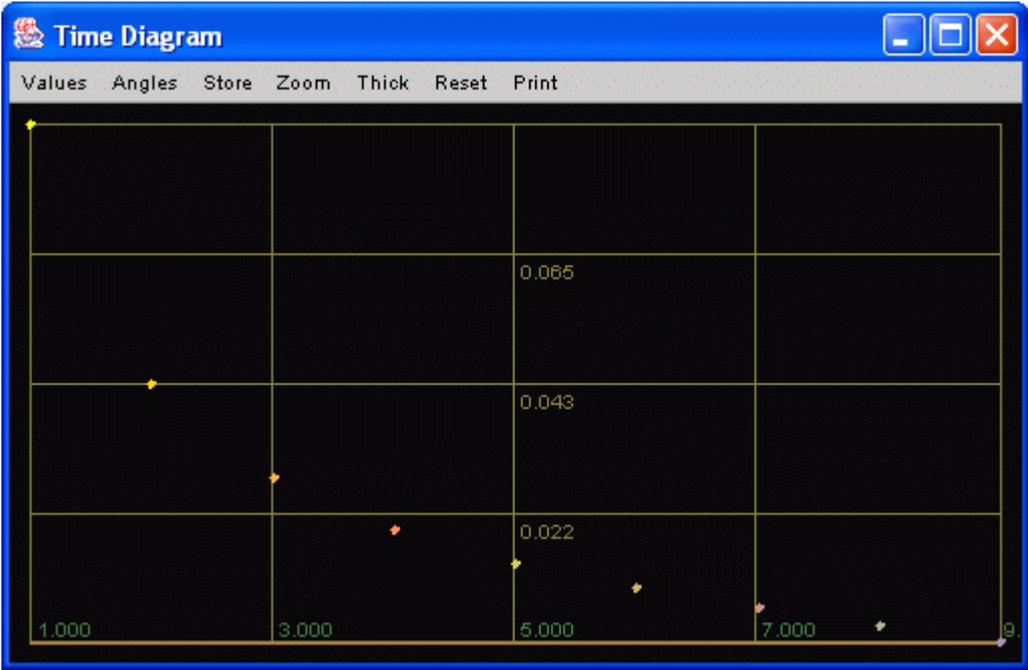


Abbildung 85: Von links nach rechts sehen Sie, beginnend bei 10 Grad Elevation, in Schritten von 10 Grad, den refraktiven Einfluß der Atmosphäre. Der Maximalwert liegt hier bei 312 Bogensekunden, entsprechend 0.087 Grad und nimmt rasch ab, wenn das Objekt höher am Himmel steht.

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß beispielsweise die Sonne, wenn sie gerade noch über dem Horizont zu sehen ist, bereits komplett unter der Horizontebene liegt. Der Refraktionseinfluß beträgt hier nämlich schon

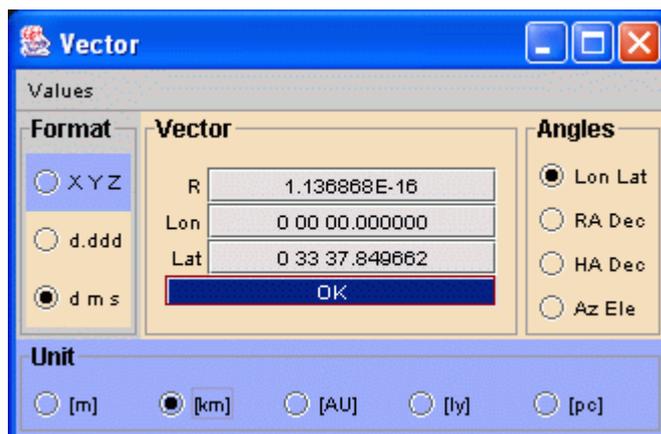


Abbildung 86: Für 0 Grad Elevation steigt die Lichtablenkung auf ein halbes Grad an. Und das entspricht gerade dem Winkeldurchmesser unserer Sonne bzw. unseres Mondes. Daher können wir die untergehende Sonne auch dann noch komplett sehen, wenn sie, rein geometrisch betrachtet, bereits vollständig untergegangen ist.

etwas mehr als eine halbes Grad und das ist der gerade der Winkel, unter dem die Sonne am Himmel erscheint.

Zusammenfassung

Wir haben eine Reihe von Beispielen betrachtet, die alle leicht mit der Astro-Toolbox nachvollzogen werden können. Im wesentlichen handelt es sich um die Veranschaulichung der Zusammenhänge, die bereits im Band „Theorie“ zur Astro-Toolbox behandelt worden sind. Somit hat sich die Objektorientierung gelohnt. Jedes Objekt beherrscht ein kleines Teilgebiet. Und da die Objekte zusammengeschaltet werden können, steht auch der Lösung umfangreicherer Probleme nichts im Wege. Die Tools tauschen untereinander Nachrichten aus und lösen dadurch in einer Gemeinschaftsarbeit eine vorgelegte Aufgabenstellung.

Weitere Beispiele sind im Software-Paket zur Astro-Toolbox enthalten, das wie schon im Vorwort erwähnt, unter <http://www.Astro-Toolbox.com> bereitsteht. Dort sind auch alle einzelnen Tools dokumentiert, so daß es nicht allzu schwer fallen dürfte, die vielfältigen Möglichkeiten auszuloten.

Literatur

- Balzer H.:** *Lehrbuch der Software-Technik – Software-Entwicklung*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996 (mit CD-ROM)
- Bastos A.:** *Celestial Objects and Satellite Astronomy*. ESRO SP-89, October 1974
- Brumberg V.A.:** *Essential Relativistic Celestial Mechanics*, Adam Hilger, Bristol, 1991
- Doberenz W.:** *JAVA*, Carl Hanser, München, 1996 (mit CD-ROM)
- Egger D.:** *Objektorientierte Modellierung eines Teilbereichs der Astronomie und Himmelsmechanik mit Implementierung in Java*. Shaker Verlag, Aachen, 2000
- Epstein L.C.:** *Relativitätstheorie – anschaulich dargestellt*, Birkhäuser, Basel, 1985
- Fliessbach T.:** *Allgemeine Relativitätstheorie*, BI-Wiss.-Verl., Mannheim, 1990
- Fowler M., Scott K.:** *UML konzentriert*, Addison Wesley, Bonn, 1998
- Grossman N.:** *The sheer Joy of Celestial Mechanics*, Birkhäuser, Boston, 1996
- Hekimoglu S.:** *Generalized iterative solution for geodetic coordinates from cartesian coordinates*. In: Bolletino di Geodesia e Scienze affini, No. 2, 1995
- Herrmann J.:** *dtv-Atlas zur Astronomie*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1990
- Kaufmann W.J. III, Comins N.F.:** *Discovering the Universe*, 4th Ed., Freeman, New York, 1996 (with CD-ROM)
- Meeus J.:** *Astronomical Formulae for Calculators*, 3rd Ed., Willmann-Bell, Richmond, 1985
- Meeus J.:** *Astronomische Algorithmen*, Barth, Leipzig, 1992
- Meschede D.:** *Gerthsen Physik*, 21. Aufl., Springer, Berlin, 2002
- Moore P., Zimmer H.:** *Guinness Buch der Sterne*. Ullstein Verlag, Frankfurt/Main, 1985
- Mueller I.I.:** *Introduction to Satellite Geodesy*. Frederick Ungar Publishing Co., New York, 1964
- North G.:** *Astronomy Explained*, Springer, London, 1997
- Oestereich B.:** *Objektorientierte Softwareentwicklung*, Oldenbourg Verlag, München Wien, 1998
- Petrahn G.:** *Grundlagen der Vermessungstechnik*, Cornelsen, Berlin, 1996
- Schmutzer E.:** *Relativitätstheorie aktuell*, 5. Aufl., Teubner, Stuttgart, 1996
- Schneider M.:** *Himmelsmechanik*, mehrere Bände, 3. völlig neu bearb. und erw. Auflage, BI-Wiss.-Verl., Mannheim: Band 1, 1992 und Band 2, 1993, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: Band 3, 1996 und Band 4, 1999
- Schneider M.:** *Satellitengeodäsie*, BI-Wiss.-Verl., Mannheim, 1988
- Schröder U.E.:** *Spezielle Relativitätstheorie*, 3. Aufl., Harri Deutsch, Thun, 1994
- Seeber G.:** *Satellite Geodesy*, de Gruyter, Berlin, 1993
- Seidelmann K. (Ed.):** *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science books, Mill Valley, CA, 1992
- Sigl R.:** *Geodätische Astronomie*, 3. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1983
- Sun:** www.sun.com, Java Development Kit + Documentation + StarOffice

Taff L.G.: *Computational Spherical Astronomy*, Wiley, New York, 1981

The Astronomical Almanac for the Year 1984, Her Majesty's Stationery Office, London, 1983

Ullenboom Chr.: *Java ist auch eine Insel*, Galileo Press, Bonn, 2001

Vanicek P., Krakiwsky E.: *Geodesy – The Concepts*, 2nd Ed., North-Holland, Amsterdam, 1986

Wilhelms G., Kopp M.: *Java professionell*, MIPT-Verlag, Bonn, 1999

Zimmermann H., Weigert A.: *ABC-Lexikon Astronomie*, 8. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995

Index

A		Geodäte	48
Aberration	50	Geozentrum	42, 47
ActiveTools	10	GM	32
add/subtract Time	12	GPS-Satellit	41
adjust Time Scale	15f.	Graphics of Vectors	35, 40
Analemma	17	Große Halbachse	33
Approximation	15	H	
Atmosphäre	53	Halley	38
Äquatorsystem	23, 45	Heliozentrum	42
B		Herbstanfang	52
Bahnelemente	32	Horizontebene	46, 54
Baryzentrum	42	J	
Beobachter	42	Jahreszeit	23
Bezugssystem	41	JulianTime	11
Bogensekunde	48	Jupiter	34, 42
Brechung des Lichtes	52	K	
Breite	45	Kepler-Ellipse	32
Breitenkreis	44	Komet	38
C		Koordinaten	41
Calendar	7, 11	L	
Computerzeit	8	Länge	45
D		Licht	47
DE405-Ephemeris	18	Lichtablenkung	50
Drehung	45	Lichtzeitkorrektur	50
E		Load	10
Eddington	48	Lösungsmodell	10
Einstein	48	M	
Ekliptikebene	33	Massepunkte	32
Ekliptikschiefe	23, 25	Mittlere Anomalie	32
Ekliptiksystem	23, 45	mittlere Sonne	17
Ellipse	32	models	7
Erde	42	N	
Erdrotationsparameter	15	Nutation	17, 23, 30
Erdsatellit	38	Nutationswinkel	45
Erdumdrehung	16	O	
F		Observer Map	39
File-Selektor-Box	10	Orbit-Vektoren	32
Fk5 Star Map	27	Originalansicht	29
Frühlingspunkt	17, 50, 52	Output Civilian Date	7
G			

P		Störungen	32
Planet Orbit	34	Subsatelliten-Punkt	40
Planetenbahn	33	T	
Pluto	34	Timer	8, 12
Polaris	27	TLE Orbit	39
Polbahn	27	Toolbutton	8f.
Polbewegung	23, 31	Toolfenster	8, 10
Popup-Menü	9	Toolgruppe	7
Präzession	23, 31	Topozentrum	42, 47
Präzessionswinkel	45	Transformation	18, 39, 41f.
R		Translation	42
Radio-Button	13	TT	36
raumfest	47	Two Line Elements	39
Refraktion	53	U	
RefTimeOrbitVector	27, 42	Umlaufbahn	32
Regenschirm	50	Ursprung	42
Relativgeschwindigkeit	50	UTC	8
Relativitätstheorie	48	V	
Rotation	23	Verbindung	10
Rotationsachse	26	W	
Rotationsgeschwindigkeit	31	wahre Sonne	17
Rotationsmatrix	45	Weltraum-Müll	41
S		Winkeldifferenz	53
Save	9	Z	
Schaltplan	7	Zeitdifferenz	14
Sekundentakt	8	Zeitgleichung	17, 20
Sidereal Time	16	Zeitskala	14
Sonne	42, 48, 54	Zeitzone	11
Sonnenuhr	17	Zoom	29
Sonnenzeit	17		
Sterntag	44		
Sternzeit	16		
Sternzeitwinkel	45		

Veröffentlichungen in der Schriftenreihe IAPG / FESG (ISSN 1437-8280):
Reports in the series IAPG / FESG (ISSN 1437-8280):

- No. 3:** Tsoulis D. (1999). *Spherical harmonic computations with topographic/isostatic coefficients*. ISBN 3-934205-02-X.
- No. 4:** Dorobantu R. (1999). *Gravitationsdrehwaage*. ISBN 3-934205-03-8.
- No. 5:** Schmidt R. (1999). *Numerische Integration gestörter Satellitenbahnen mit MATLAB*. ISBN 3-934205-04-6.
- No. 6:** Dorobantu R. (1999). *Simulation des Verhaltens einer low-cost Strapdown-IMU unter Laborbedingungen*. ISBN 3-934205-05-4.
- No. 7:** Bauch A., Rothacher M., Rummel R. (2000). *Bezugssysteme in Lage und Höhe. Tutorial zum Kursus INGENIEURVERMESSUNG 2000*. ISBN 3-934205-06-2.
- No. 8:** Rothacher M., Zebhauser B. (2000). *Einführung in GPS. Tutorial zum 3. SAPOS-Symposium 2000 in München*. ISBN 3-934205-07-0.
- No. 9:** Ulrich M. (2000). *Vorhersage der Erdrotationsparameter mit Hilfe Neuronaler Netze*. ISBN 3-934205-08-9.
- No. 10:** Seitz F. (2000). *Charakterisierung eines bistatischen Rayleigh- und Raman-Lidars zur Bestimmung von höhenaufgelösten Wasserdampfprofilen*. ISBN 3-934205-09-7.
- No. 11:** Meyer F. (2000). *Messung von höhenaufgelösten Wasserdampfprofilen unter Verwendung eines bistatischen Raman-Lidars*. ISBN 3-934205-10-0.
- No. 12:** Peters T. (2001). *Zeitliche Variationen des Gravitationsfeldes der Erde*. ISBN 3-934205-11-9.
- No. 13:** Egger D. (2001). *Astronomie und Java – Objekte der Astronomie*. ISBN 3-934205-12-7.
- No. 14:** Steigenberger P. (2002). *MATLAB-Toolbox zur TOPEX/POSEIDON Altimeterdatenverarbeitung*. ISBN 3-934205-13-5.
- No. 15:** Schneider M. (2002). *Zur Methodik der Gravitationsfeldbestimmung mit Erdsatelliten*. ISBN 3-934205-14-3.
- No. 16:** Dorobantu R., Gerlach C. (2004). *Investigation of a Navigation-Grade RLG SIMU type iNAV-RQH*. ISBN 3-934205-15-1.
- No. 17:** Schneider M. (2004). *Beiträge zur Bahnbestimmung und Gravitationsfeldbestimmung mit Erdsatelliten sowie zur Orientierung von Rotationssensoren*. ISBN 3-934205-16-X.
- No. 18:** Egger D. (2004). *Astro-Toolbox, Theorie*. ISBN 3-934205-17-8.
- No. 19:** Egger D. (2004). *Astro-Toolbox, Praxis*. ISBN 3-934205-18-6.

Weitere Exemplare können bezogen werden unter:

Copies are available from:

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
Technische Universität München
Arcisstrasse 21
D-80290 München
Germany
Telefon: +49-89-289-23190
Telefax: +49-89-289-23178
Email: gerlach@bv.tum.de

Oder im Internet:

Or via Internet:

<http://tau.fesg.tu-muenchen.de/~iapg/web/veroeffentlichung/schriftenreihe/schriftenreihe.php>

