

Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

- 17.10. Einführung: Überblick & Geschichte (H.B.)
- 24.10. Sternpositionen, Koordinaten, Zeitmessung (C.F.)**
- 31.10. Teleskope und Instrumentierung (H.B.)
- 07.11. Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)
- 14.11. Planetensystem(e) & Keplergesetze (H.B.)
- 21.11. Sonne & Sterne, Typen / Klassifikation, HR-Diagramm (C.F.)
- 28.11. Interstellare Materie: Chemie & Matriekreislauf (H.B.)
- 05.12. Sternentstehung, Akkretionsscheiben & Jets (H.B.)
- 12.12. Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)
- 19.12. Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)
- - - Weihnachtspause
- 09.01. Mehrfachsysteme & Sternhaufen, Dynamik (C.F.)
- 16.01. Exoplaneten & Astrobiologie (H.B.)
- 23.01. Die Milchstraße (H.B.)
- 30.01. Zusammenfassung (C.F. & H.B.)
- 06.02. Prüfung (?)

2. Grundlagen der Astronomie und Astrophysik

2.1.a Positionen der Himmelskörper

2.2. Koordinatensysteme

2.1.b Positionen der Himmelskörper

2.3. Entfernungsbestimmung

2.4. Zeitmessung

Christian Fendt, Max-Planck-Institut für Astronomie

2.1 Positionen der Himmelskörper

Nachthimmel

Sterne -> Position, Helligkeit, Farbe

2.1 Positionen der Himmelskörper



Sternbilder:

- historisch-kulturelle Nomenklatur
- griechische Buchstaben nach Helligkeit im Sternbild
- hellste Sterne haben eigenen Namen

2. 1 Positionen der Himmelskörper

Entfernung der Sterne im Großen Bär / Großer Wagen zur Erde/Sonne

Bez. (Bayer)	Namen, historisch	Hell. [m]	Dist. [Lj]	Typ
α	Dubhe, Thahr al Dub al Akbar	1.81	124	K1 II-III
β	Merak	2.34	79	A1 V
γ	Phekda, Phegda, ...	2.41	84	A0 V SB
δ	Megrez, Kaffa	3.32	81	A3 V
ϵ	Alioth	1.7-1.8	81	A0p
ζ	Mizar	2.23	78	A2 V
η	Benetnasch, Alkaid	1.86	101	B3 V

Entfernungen in der Astronomie:

1 Lichtjahr = 1 Lj = Strecke, die Licht in 1 Jahr zurücklegt = 9.5×10^{12} km

-> Sterne, die eng am Himmel stehen, stehen in Wirklichkeit nicht immer eng beisammen (Entfernung!)

2.1 Positionen der Himmelskörper

Sterne = “Fixsterne”

Scheinbar zeitlich feste Anordnung am Himmel:
Sternbilder (Planeten = “Wandelsterne”)

“Fest” nach menschlichem Maßstab

Position der Sterne am Himmel **veränderlich**:

- 1) Himmelskugel dreht sich scheinbar wegen **Erdrotation** (täglich)
- 2) **Eigenbewegung** der Sterne: **Pekuliarbewegung**
- 3) **Kreiselbewegung** der Erde in 26000 Jahren: **Präzession**
- 4) **Erdbahn** um die Sonne, **Parallaxe** (jährlich)
- 5) Bahnbewegung von **Mehrfachsternen**

-> **Klassische Astronomie**:

Astrometrie = Vermessung von Position & Bewegung der Himmelskörper

-> Benötigt wird: **Definition eines “himmlischen” Koordinatensystems**



2.1 Positionen der Himmelskörper

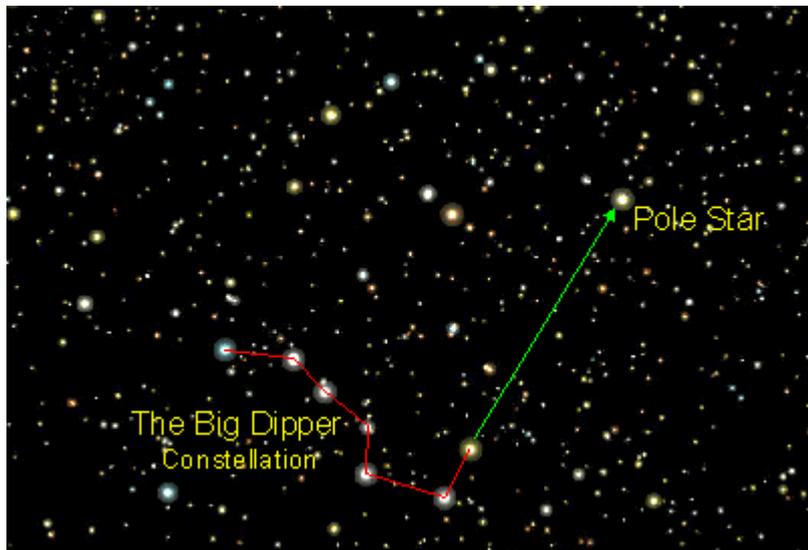
Von der Erde aus gesehen:

Sterne (Sonne, Mond, Planeten) bewegen sich von O -> W

-> **Erde rotiert** von W -> O

Blick nach Süden (auf Nordhalbkugel):

Sterne bewegen sich von “links” nach “rechts”



Blick nach Norden:

Wegweiser zum Polarstern



2.2 Himmelskoordinaten

Sternpositionen & Koordinatensysteme

-> Lokalisierung der Position eines Sterns oder eines anderen astronomischen Objektes auf der Himmelskugel:



Astrometrie: Messung von Positionen

Koordinatensysteme: Zuordnung der “Stern”positionen zu zwei sphärischen Koordinaten, analog der geographischen Koordinaten auf der Erdkugel

Dritte Koordinate ist **Entfernung:** hier (noch) nicht berücksichtigt

2.2 Himmelskoordinaten

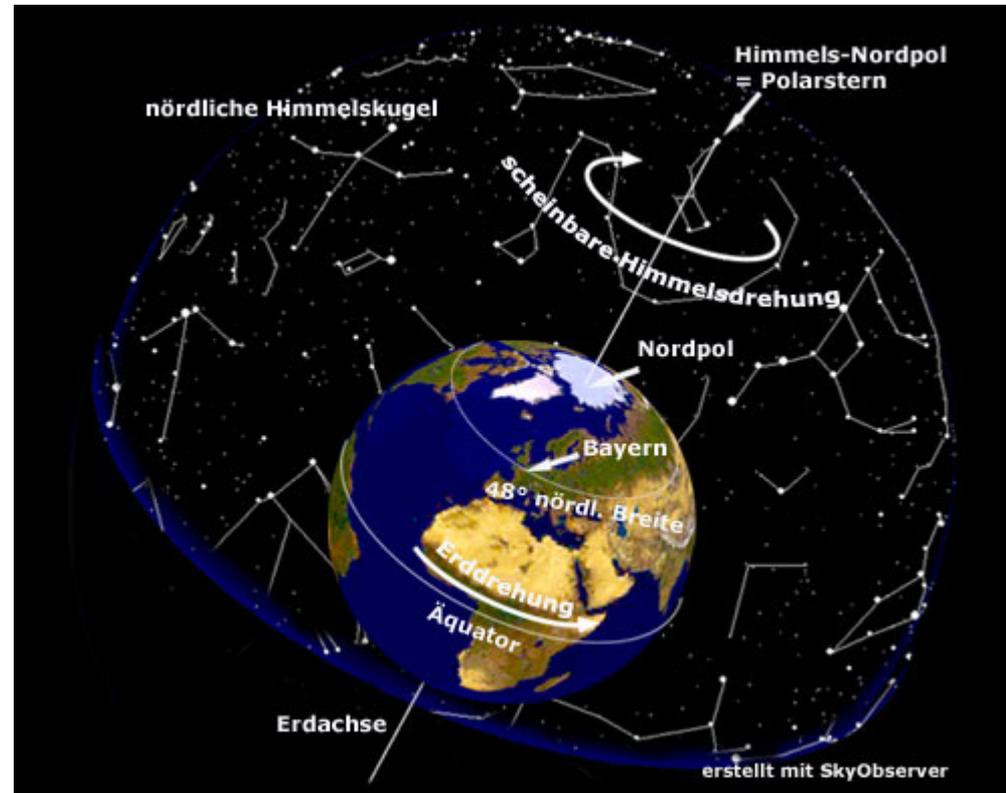
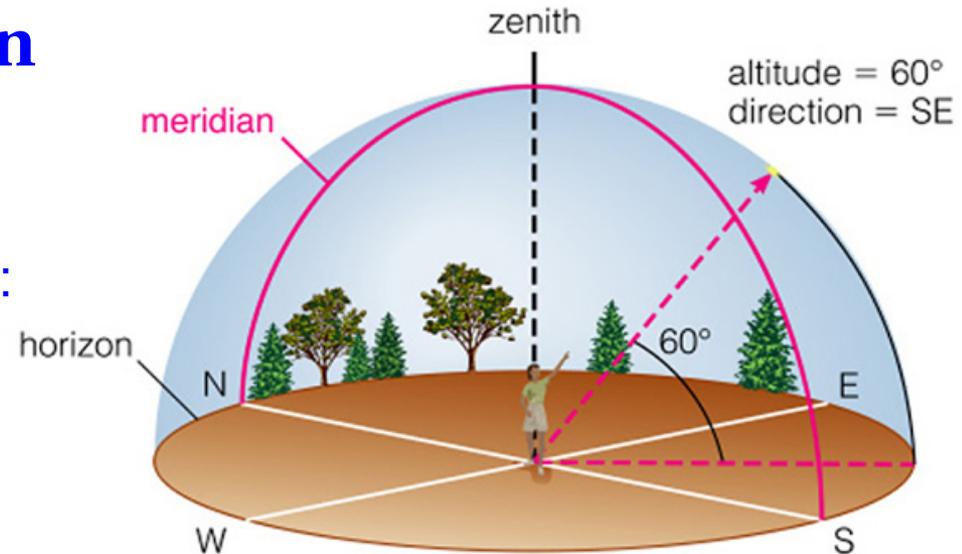
Problematik:

Orientierung @ Beobachtungsplatz:

- > **horizontale Koordinaten**
(Zenit, Horizont, Meridian)
- > **“feste” äquatoriale Koordinaten**
-> fest für den Standort,
aber nicht am Himmel

Orientierung @ Himmel:

- > **“mitbewegte” äquatoriale Koordinaten**
- > festes Koordinatensystem am Himmel,
-> Ausgleich der Bewegung der Erde



2.2 Himmelskoordinaten

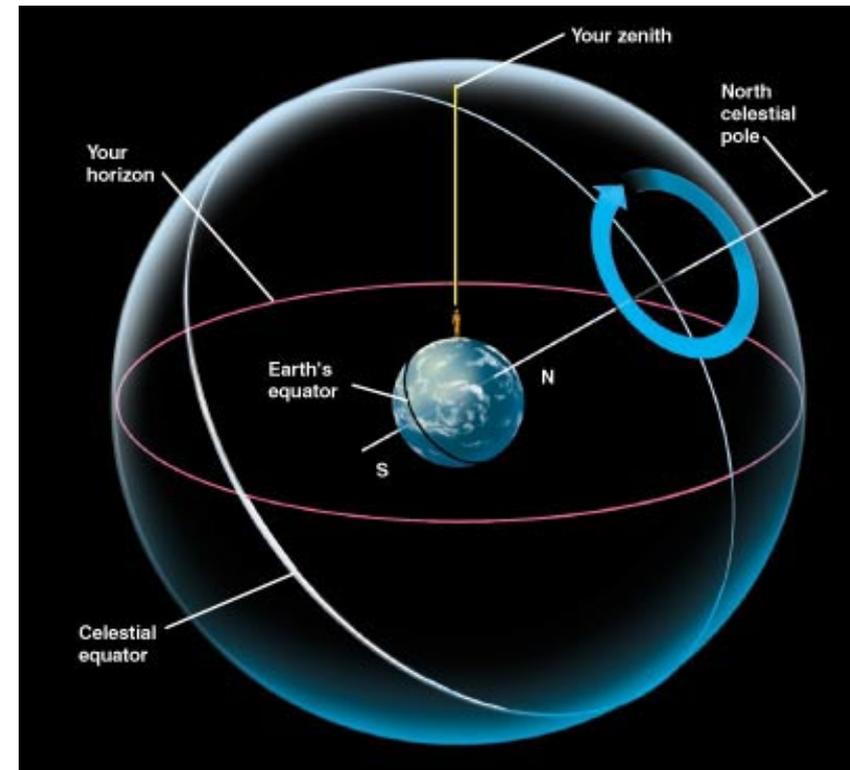
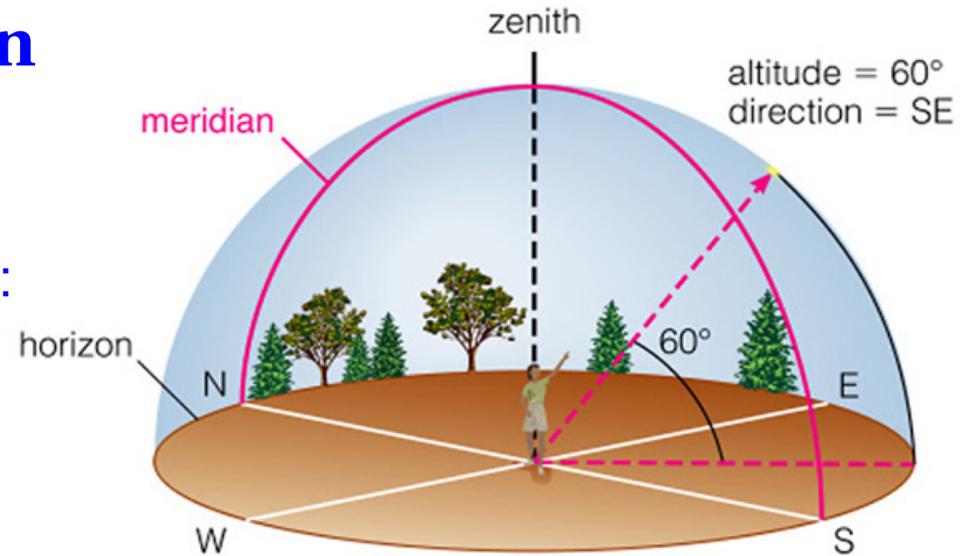
Problematik:

Orientierung @ Beobachtungsplatz:

- > horizontale Koordinaten
(Zenit, Horizont)
- > "feste" äquatoriale Koordinaten
-> fest für den Standort,
aber nicht am Himmel

Orientierung @ Himmel:

- > "mitbewegte" äquatoriale Koordinaten
- > festes Koordinatensystem am Himmel,
-> Ausgleich der Bewegung der Erde
- > **sphärisches Koordinatensystem am Himmel**



2.2 Himmelskoordinaten

Sphärische Koordinatensysteme sind definiert durch:

- (1) **Grund-Ebene** = Großkreis (= “Äquator”) mit dazugehörigen **Polen** und Parallelkreisen
 - (2) **Großkreise** der Längengrade von Pol zu Pol
 - (3) Einen **Nullpunkt** des Koordinatensystems:
Schnittpunkt des Null-Längengrades
(z.B. Meridian von Greenwich) mit der Referenzebene
- ⇒ **Erste Koordinate**: Winkeldistanz des Längengrades eines Objekts vom Null-Längengrad
(wie z.B. geographische Länge von 0° bis $+360^\circ$ oder 0^h bis 24^h)
- ⇒ **Zweite Koordinate**: Winkeldistanz eines Objekts von der Referenzebene, Höhe
(wie z.B. geographische Breite von -90° bis $+90^\circ$)

2.2 Himmelskoordinaten

Konzept der Himmelskugel:

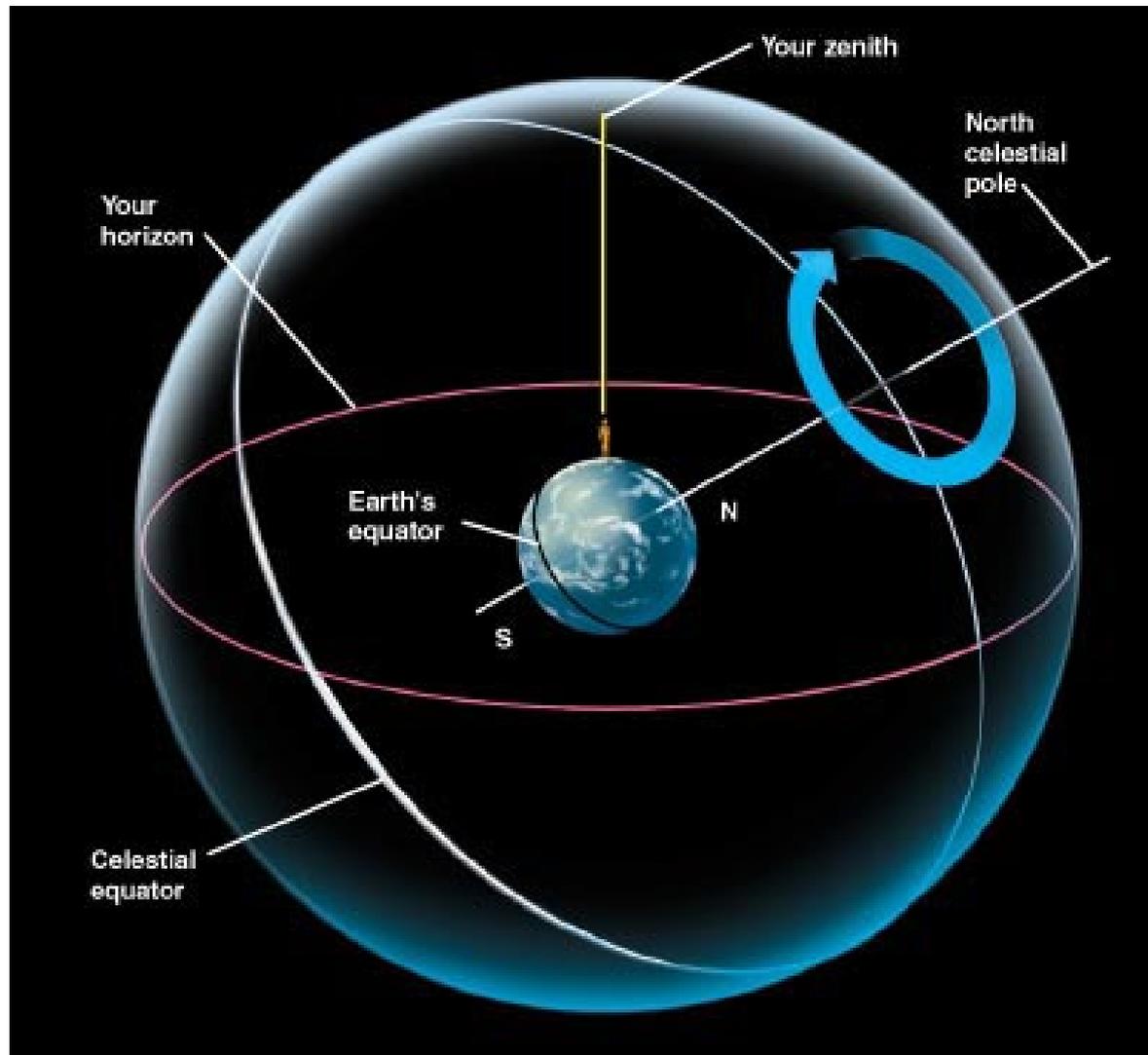
-> **Projektion** der geographischen Koordinaten in den Himmel

1) Grundkreis:

Himmelsäquator =
Projektion des
Erdäquators auf
den Himmel

2) Nordpol & Südpol:

Verlängerung der
Erdrotationsachse
-> Himmelsnordpol
liegt nahe des
Polarsterns (Zufall)



2.2 Himmelskoordinaten

Konzept der

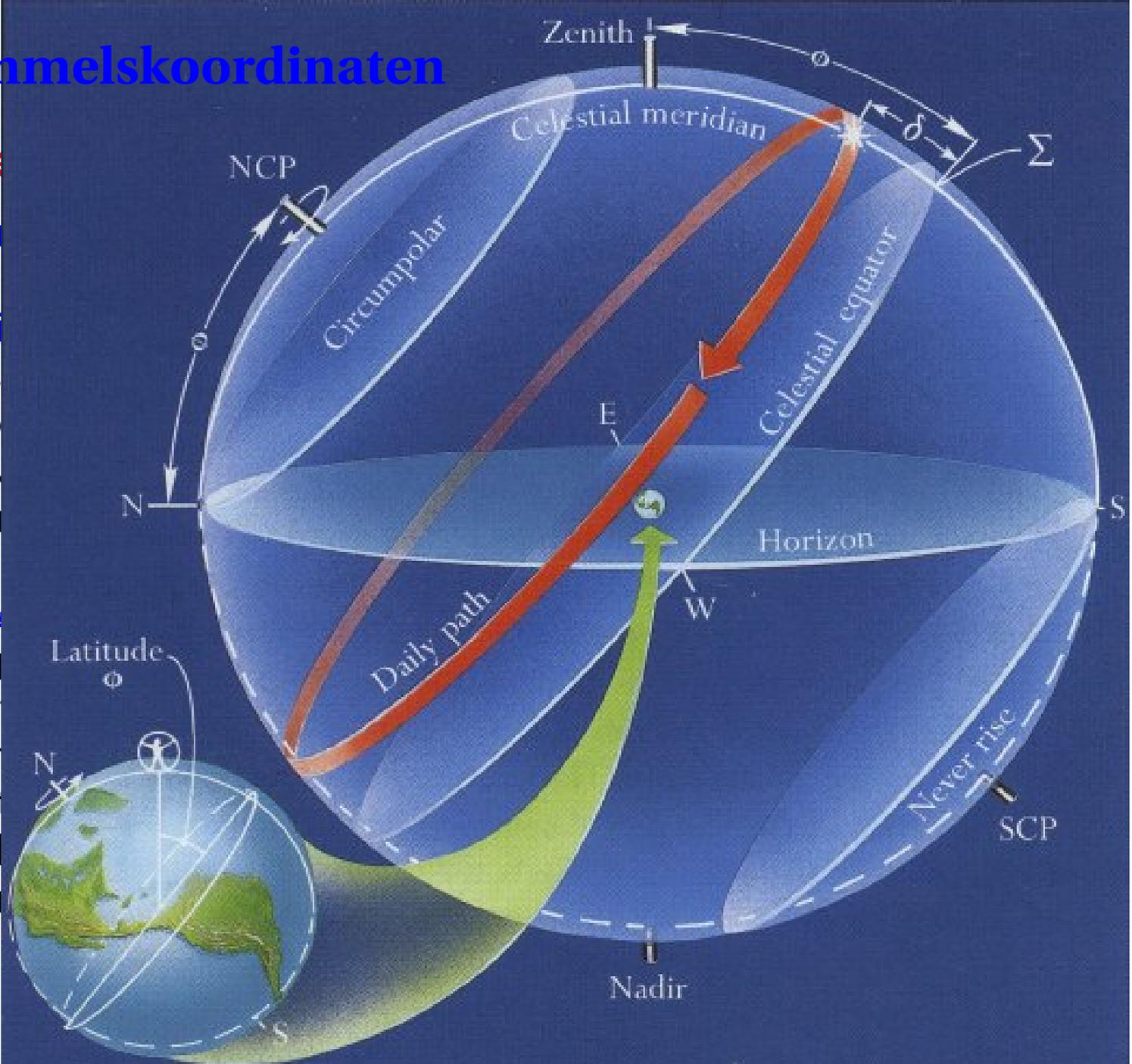
-> Projektion

1) Grundkreis

Himmels
Projektion
Erdäquator
den Himmels

2) Nordpol &

Verlängerung
Erdrotationsachse
-> Himmelspol
liegt am
Nordpol
(Zu



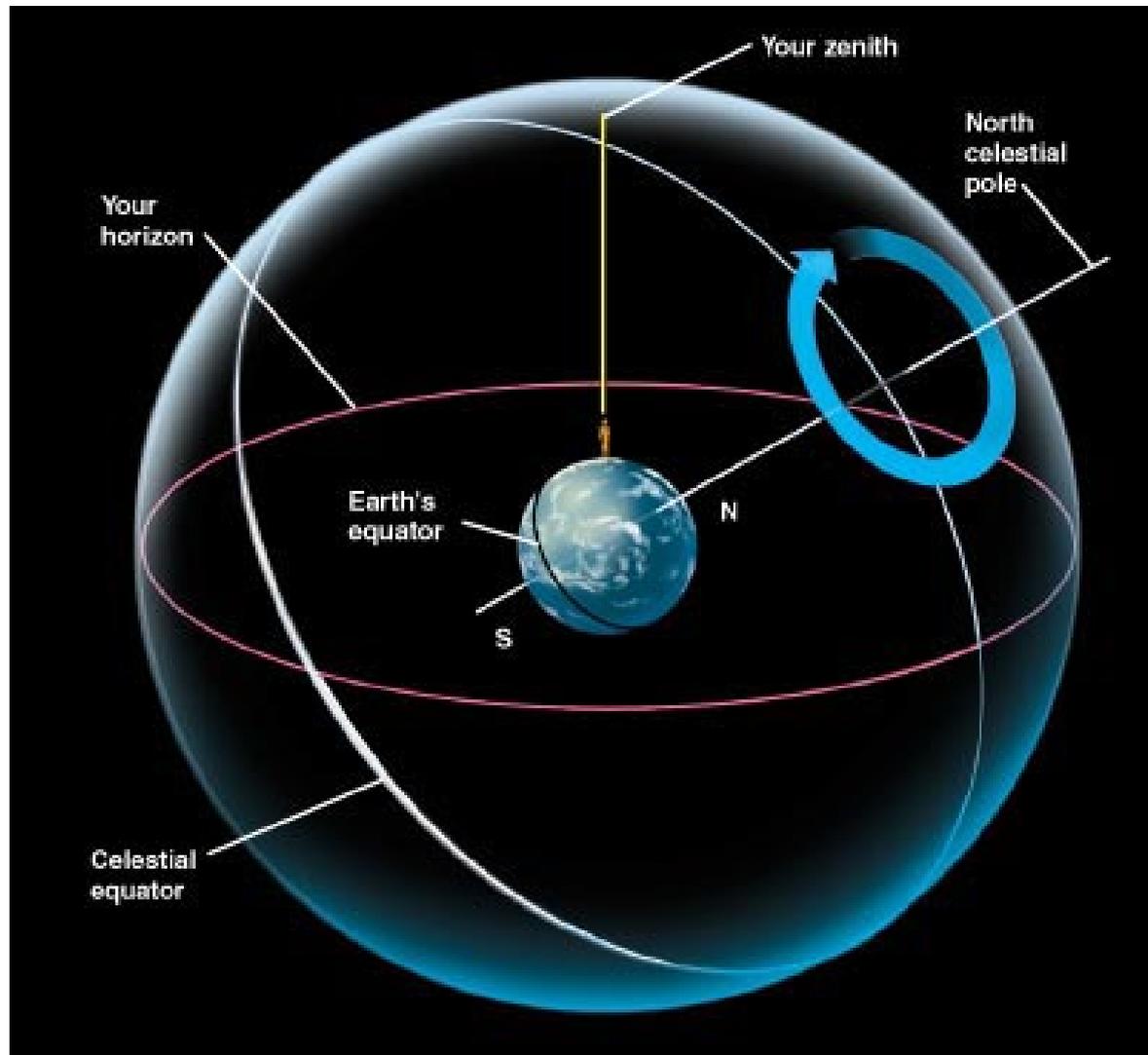
2.2 Himmelskoordinaten

Konzept der Himmelskugel:

-> Projektion der geographischen Koordinaten in den Himmel

3) Null-Längenkreis:

-> **Konvention !!!!**



2.2 Himmelskoordinaten

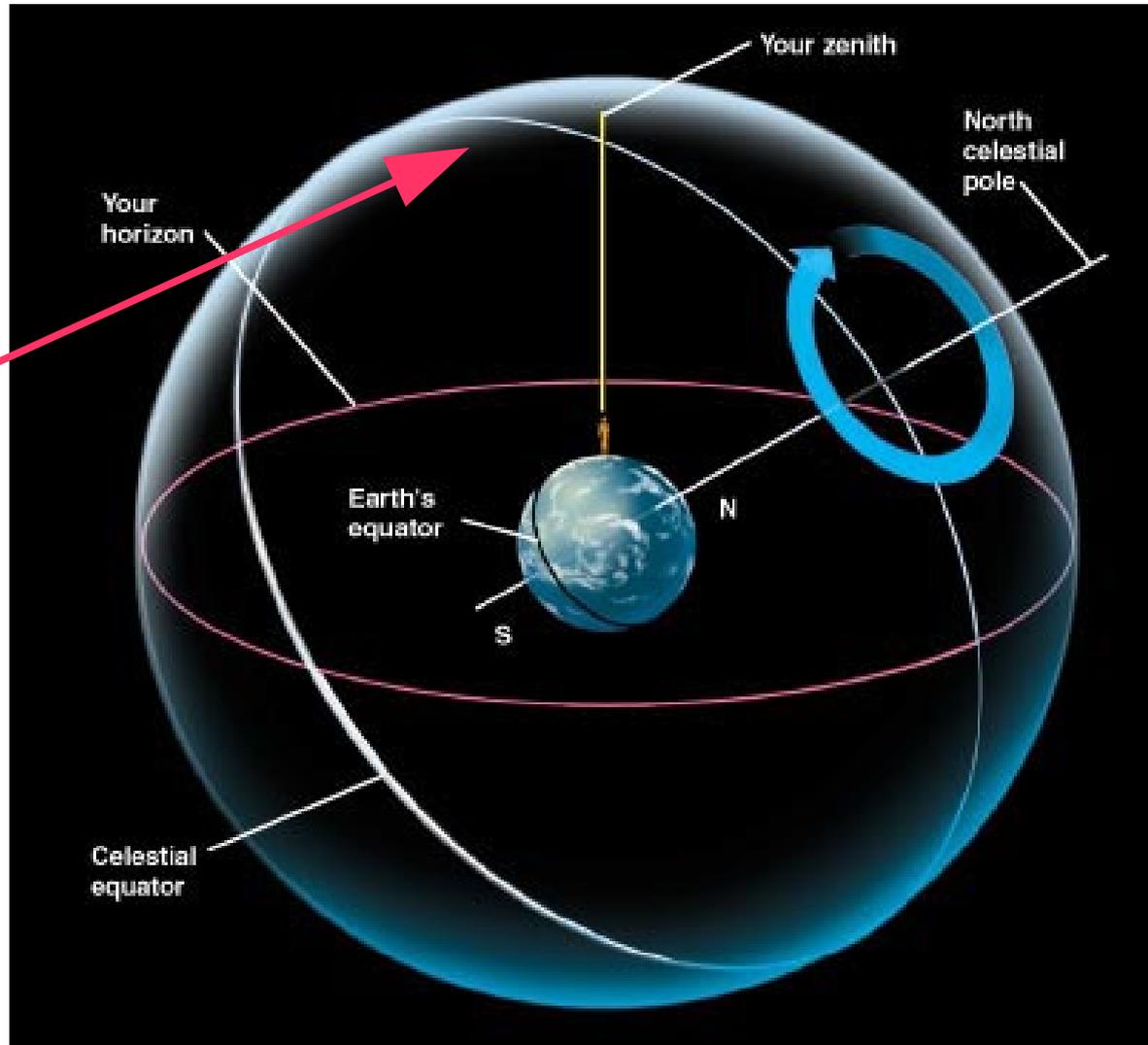
Festes äquatoriales Koordinatensystem

3) Null-Längenkreis:

Großkreis durch
Pol,
Zenit und
Südrichtung =
Meridian

-> Null - Längenkreis
festgelegt durch
Standort des
Beobachters

-> Koordinatensystem
bewegt sich wegen
Erddrotation



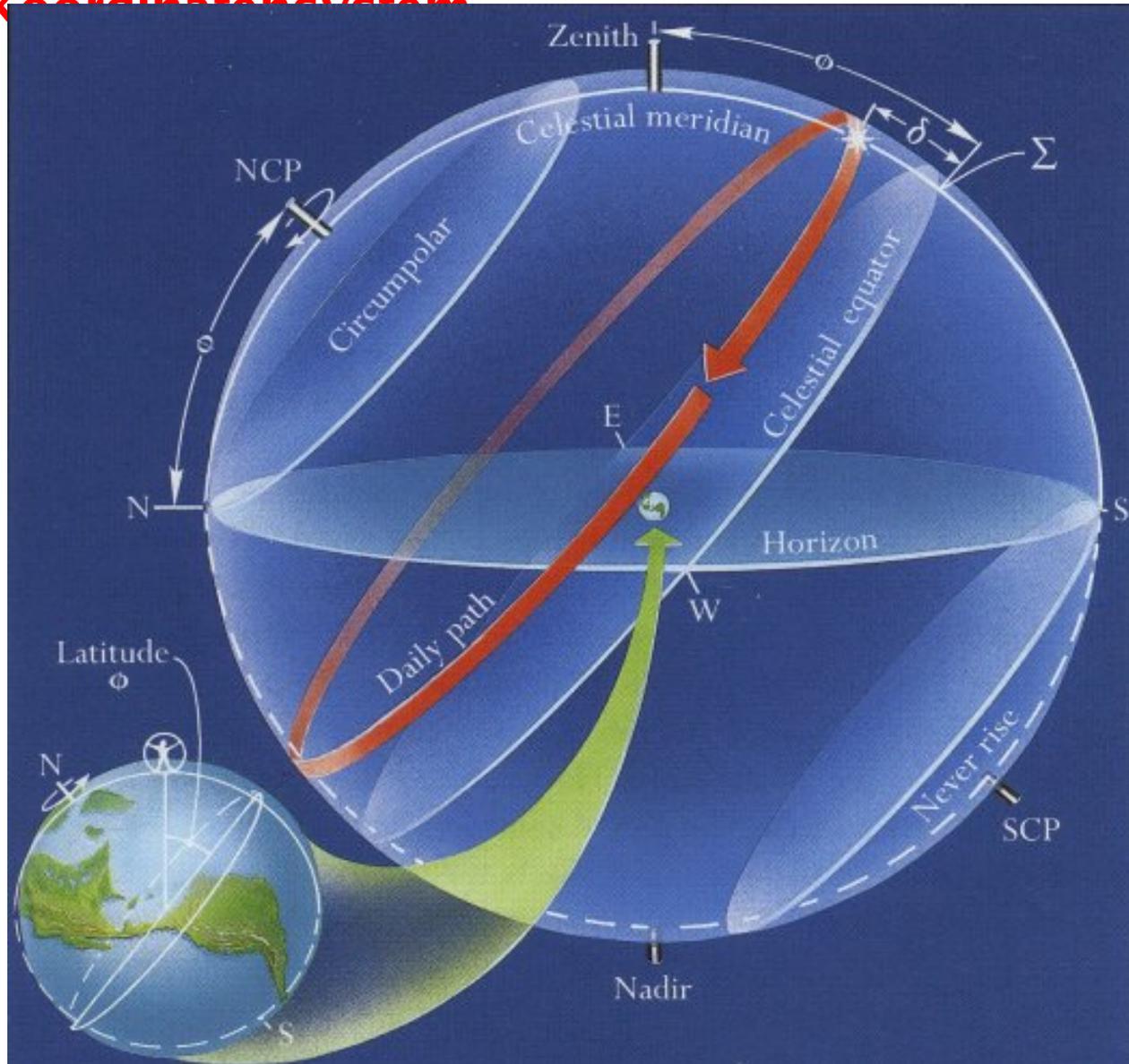
2.2 Himmelskoordinaten

Festes äquatoriales Koordinatensystem

4) Koordinaten:

Stundenwinkel t =
Abstand des
Längengrades
des Objekts (Stern)
vom Meridian:
 $0^h \dots 24^h$;
 $S \rightarrow W \rightarrow N \rightarrow O \rightarrow S$
(links-händiges System)

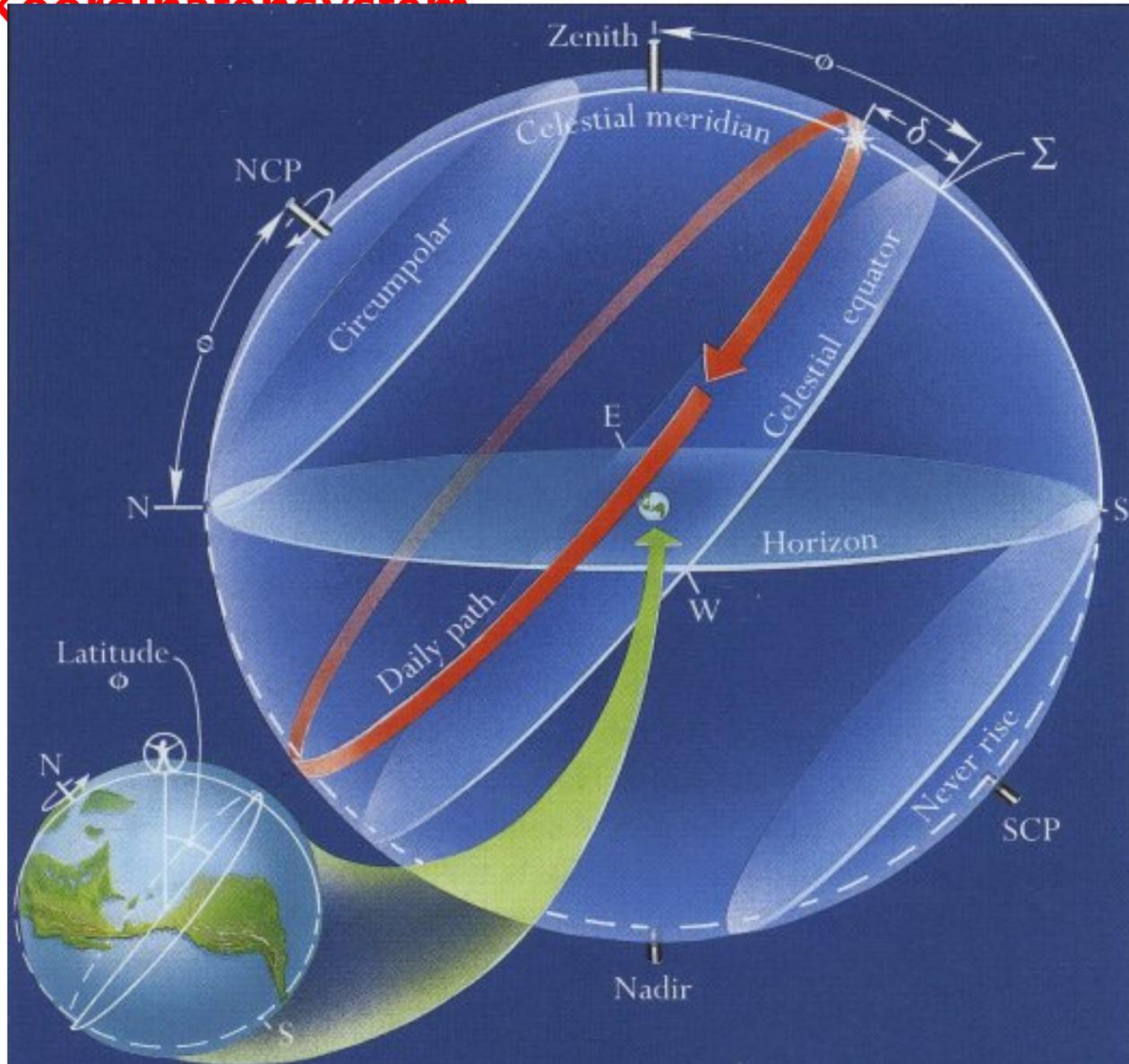
Deklination δ =
Winkeldistanz zum
Äquator ($-90^\circ \dots +90^\circ$)



2.2 Himmelskoordinaten

Festes äquatoriales Koordinatensystem

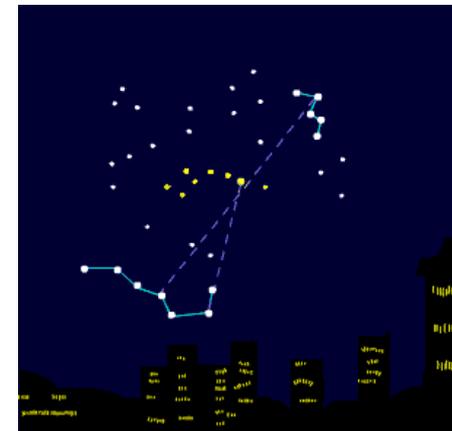
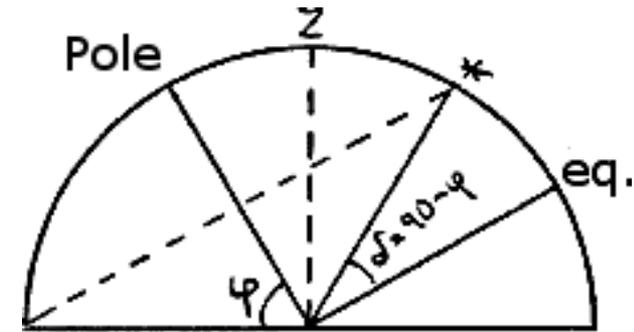
- > Tägliche Rotation des Himmels:
Periode: $23^{\text{h}}56^{\text{m}}$
- > Bewegung am Himmel verläuft gekrümmt, nicht auf Großkreisen
- > Höhe des Pols = geographische Breite
- > Zirkumpolar-Sterne nahe des Himmels-Pols



2.2 Himmelskoordinaten

Festes äquatoriales Koordinatensystem

- > $\delta = 0^\circ$: Sterne für 12^h über dem Horizont
- > $\delta \geq 0^\circ$: Sterne über dem Horizont für $\geq 12^h$
- > $\delta > 90^\circ - \varphi$: Zirkumpolarsterne
- > φ = geographische Breite = Höhe des Pols über dem Horizont = Zenitdistanz des Äquators im Süden
- > Am (irdischen) Nordpol: alle Sterne nördlich des Äquators sind **zirkumpolar**, alle südlichen bleiben unsichtbar
- > Am (irdischen) Äquator: alle Sterne befinden sich 12^h über und 12^h unter dem Horizont, keine Zirkumpolarsterne
- > **Stundenwinkel t** nimmt über den Tag alle Werte an (Erdrotation)
 - > **t** wird in **Zeiteinheiten** gemessen, nicht in Grad:
 $24^h = 360^\circ$, $1^h = 15^\circ$, $1^m = 15'$,
 $1^\circ = 4^m$, $1' = 4^s$, $1^s = 15''$, $1'' = 0.067^s$



2.2 Himmelskoordinaten

Mitbewegtes äquatoriales Koordinatensystem

- > am Himmel **ortsfeste Koordinaten** - unabhängig von der täglichen Rotation des Himmels
- > **Grundkreis:** Himmelsäquator
- > **Nordpol & Südpol:** Verlängerung der Erdrotationsachse
 - > Nordpol liegt nahe des Polarsterns
- > **Null-Längenkreis:**

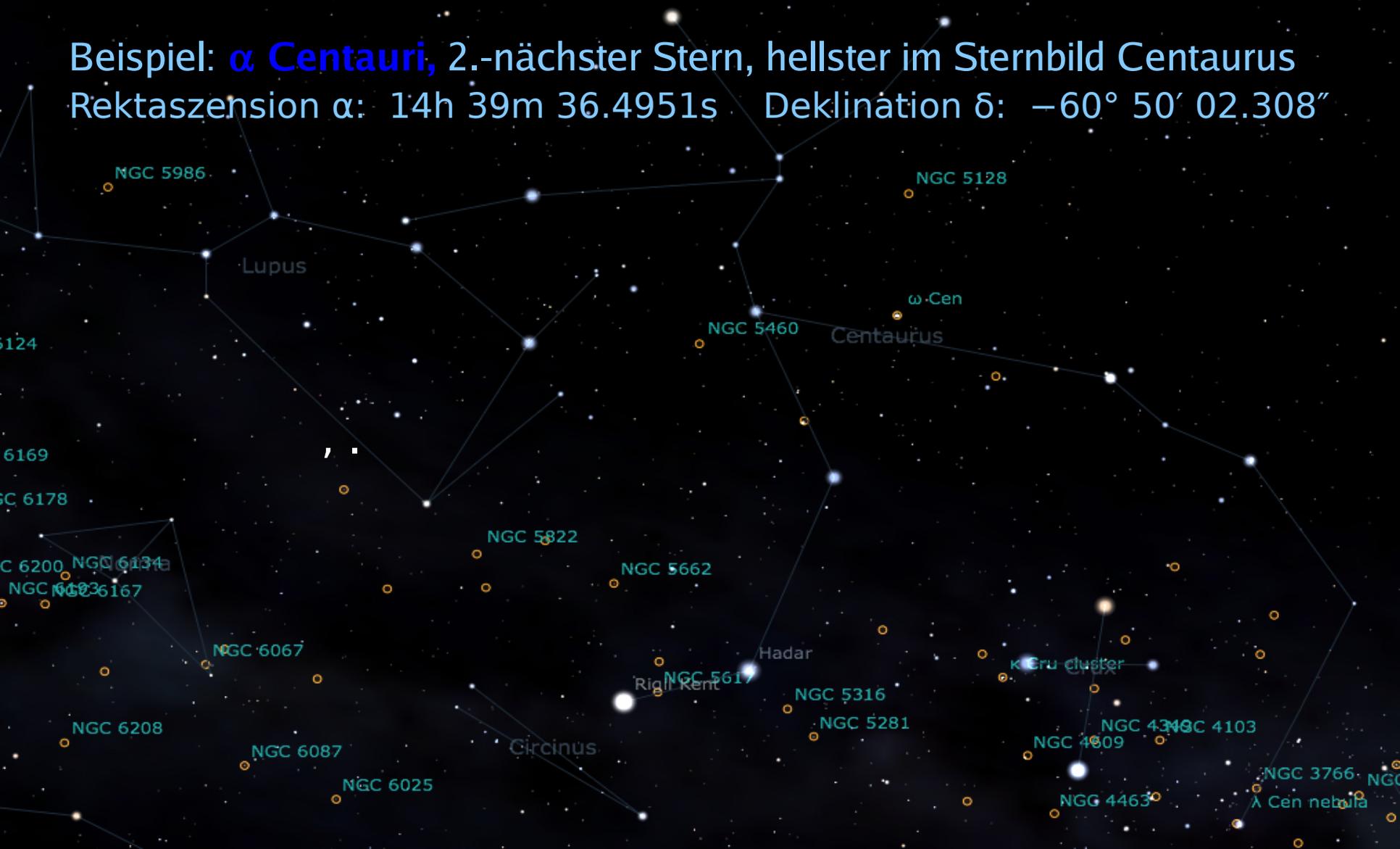
Großkreis durch den **Frühlingspunkt γ** = Position der Sonne am Frühlingsbeginn, Schnittpunkt von Ekliptik- und Äquatorebene (zum Frühlingsbeginn)

2.2 Himmelskoordinaten

Mitbewegtes äquatoriales Koordinatensystem

Beispiel: α Centauri, 2.-nächster Stern, hellster im Sternbild Centaurus

Rektaszension α : 14h 39m 36.4951s Deklination δ : $-60^\circ 50' 02.308''$



2.2 Himmelskoordinaten

Mitbewegtes äquatoriales Koordinatensystem

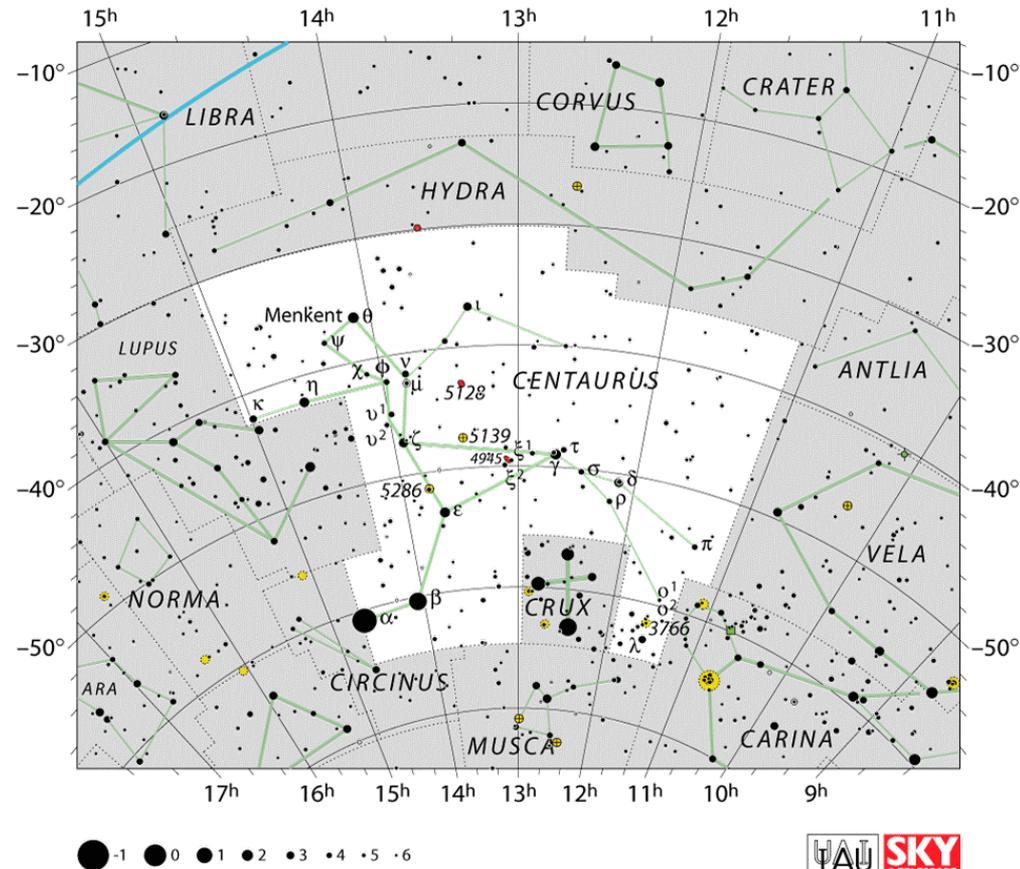
Beispiel: α Centauri, 2.-nächster Stern, hellster im Sternbild Centaurus

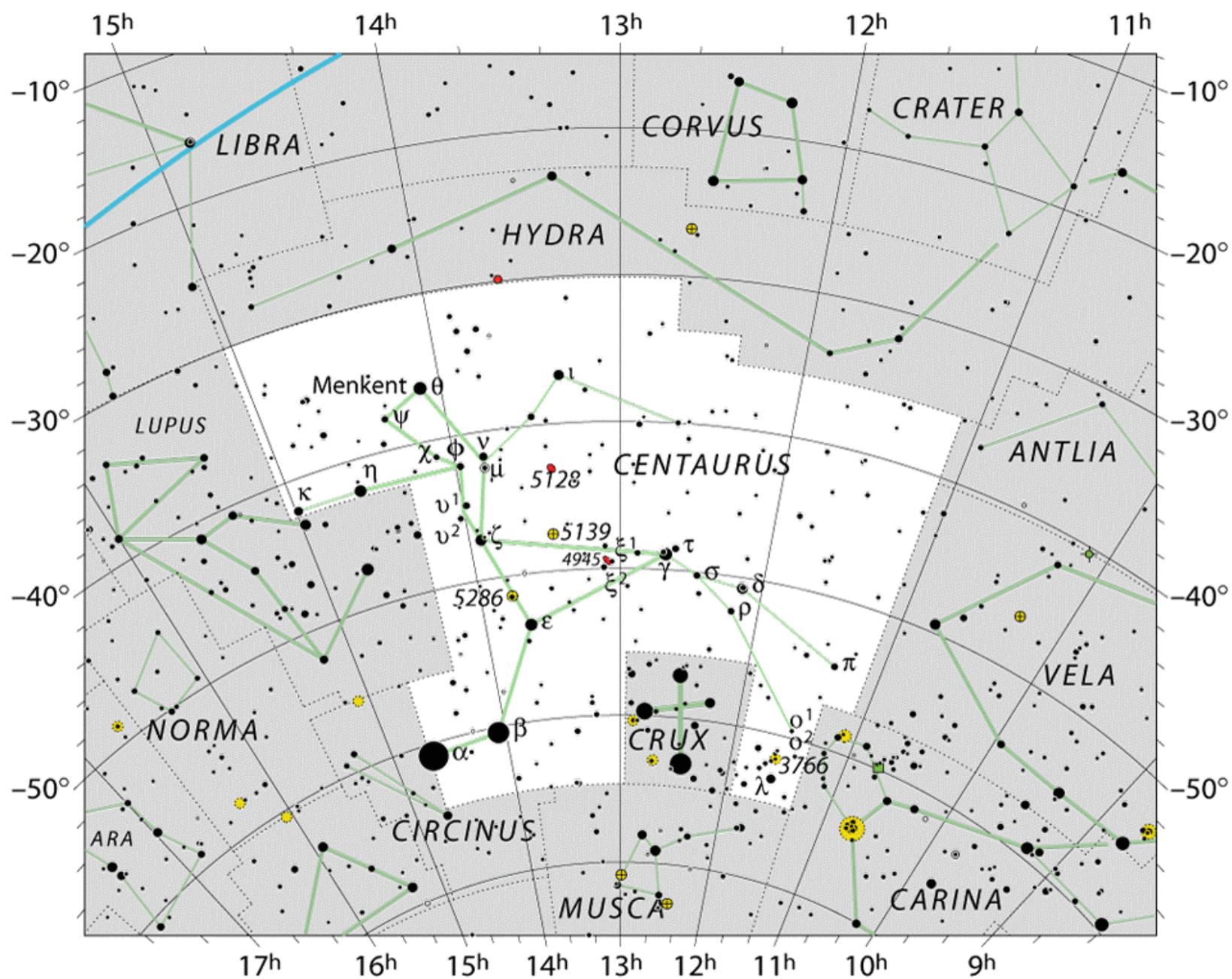
Rektaszension α : 14h 39m 36.4951s Deklination δ : $-60^\circ 50' 02.308''$

α in h (Stunden),
m (Minuten),
s (Sekunden)
 δ in $^\circ$ (Grad),
' (Bogenminuten),
" (Bogensekunden)

Punktgröße entspricht Helligkeit
Weißes Gebiet: Sternbild (Def.)

[www.constellation-guide.com/
constellation-list/
centaurus-constellation/
centaurus-constellation-map/](http://www.constellation-guide.com/constellation-list/centaurus-constellation/centaurus-constellation-map/)





2.2 Himmelskoordinaten

Mitbewegtes äquatoriales Koordinatensystem

-> Koordinaten α , δ sind unabhängig von Erdrotation, also \sim konstant

-> Definition:

θ = Sternzeit = Stundenwinkel des Frühlingspunktes
(abhängig von der geographischen Länge)

Es gilt: $\theta = t + \alpha$

Für einen Stern im Meridian gilt $t = 0$, also $\theta = \alpha$

-> z.B. stehen zur Sternzeit 7^h die Sterne mit $\alpha = 7^h$ im Meridian
(haben also ihre höchste Höhe über dem Horizont erreicht)

-> Koordinatensystem ist immer noch nicht fest fixiert im Weltraum,
da Frühlingspunkt sich durch Präzession und Nutation der
Erdachse verschiebt (um jeweils 20" und 50" pro Jahr).

-> Daher: Spezifikation eines Referenz-Äquators und des
Referenz-Frühlingspunktes durch Jahresangabe ("Epoche"):
z.B.: α_{1950} oder α_{2000} , oder $\alpha(1950)$ oder $\alpha(2000)$

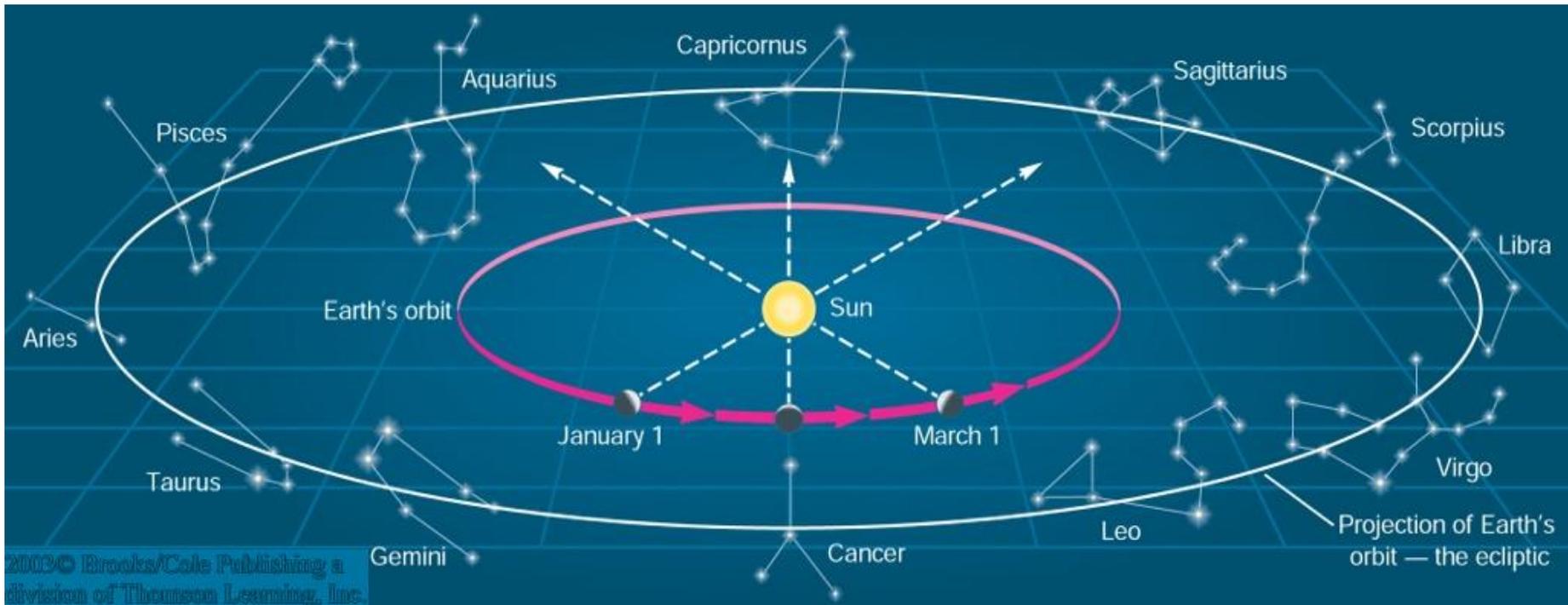
2. 1 Positionen der Himmelskörper

Von außen auf die Erdbahn gesehen:

Erdbewegung um Sonne von W -> O

Sonne bewegt sich von W -> O durch die Sternbilder

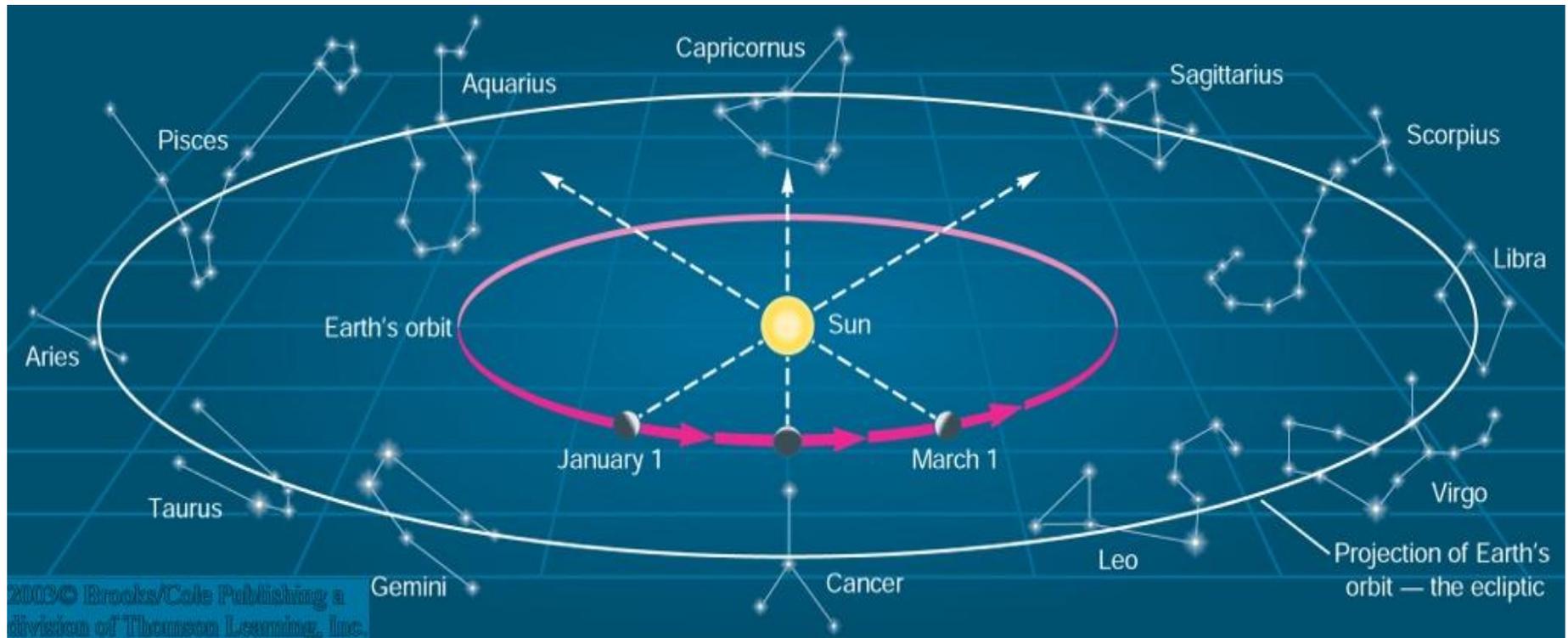
Sterne gehen jede Nacht früher auf



2. 1 Positionen der Himmelskörper

Ebene der “Ekliptik

- > Großkreis der **Sonnenbewegung** am Himmel:
 - > Scheinbare Bahn der Sonne auf die Himmelskugel (unter der sich die Erde dreht...)
 - > Sonne “bewegt” sich durch “**12**” **Sternbilder** (eigentlich durch 13)



2. 1 Positionen der Himmelskörper

Ebene der "Ekliptik"

-> **Frühlingspunkt:** 

= **Schnittpunkt** von
Ekliptik und
Himmelsäquator an der
Himmelskugel

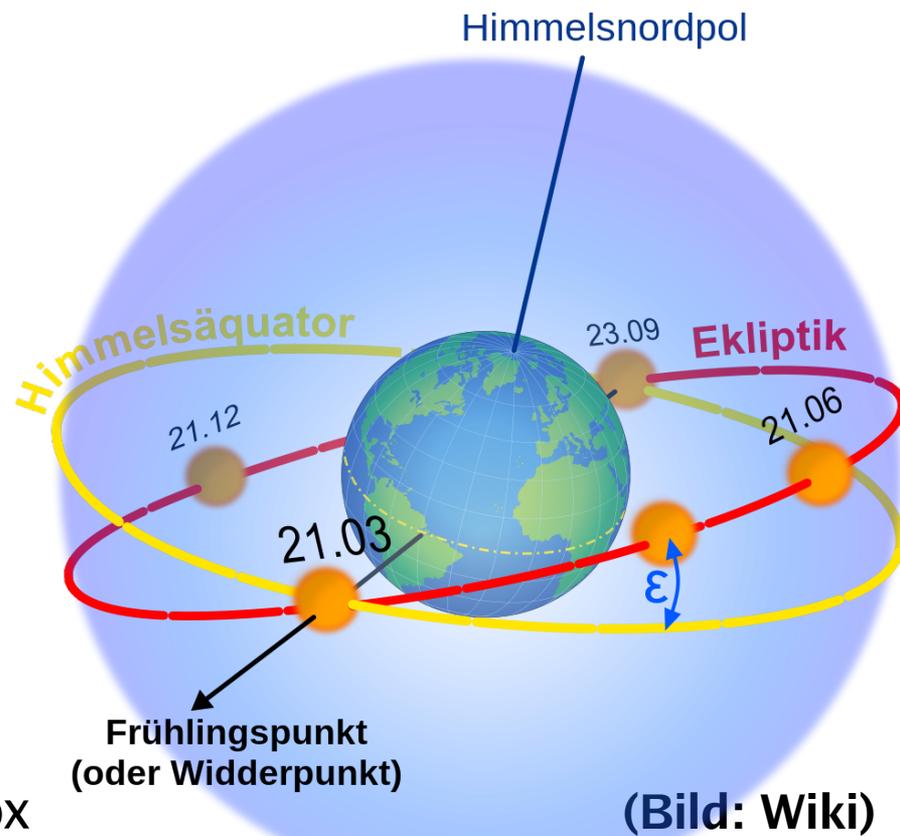
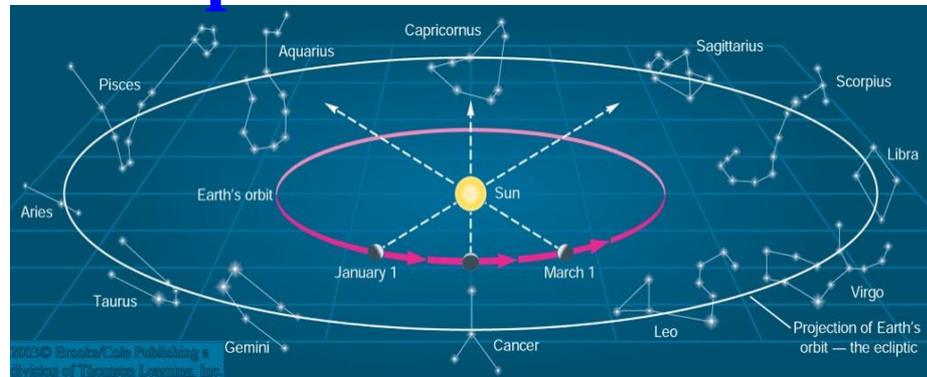
Standpunkt der Sonne am 21.3.
(Tag-und-Nacht-Gleiche)

-> Wegen Präzession und Nutation
der Erde **wandert Frühlingspunkt!**

-> Heute im **Sternbild Fische**. Bei
erstmaliger Berechnung
noch im Sternbild Widder
(alternativ: Widderpunkt)



-> Engl: vernal equinox, spring equinox



2. 1 Positionen der Himmelskörper

Ebene der "Ekliptik"

-> **Frühlingspunkt:** 

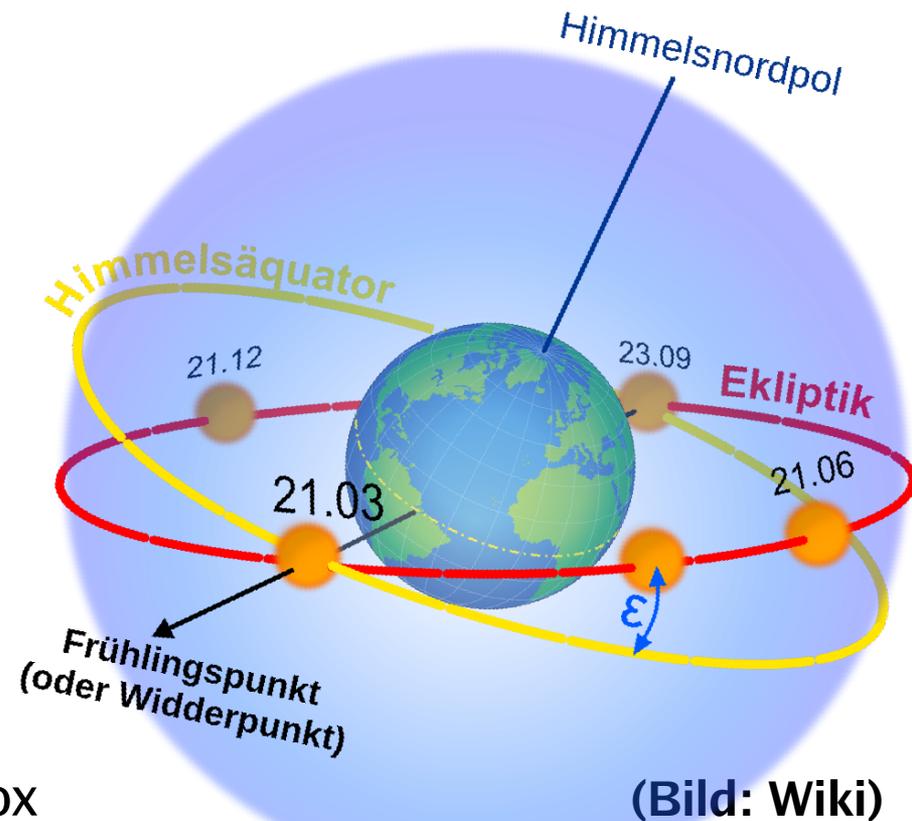
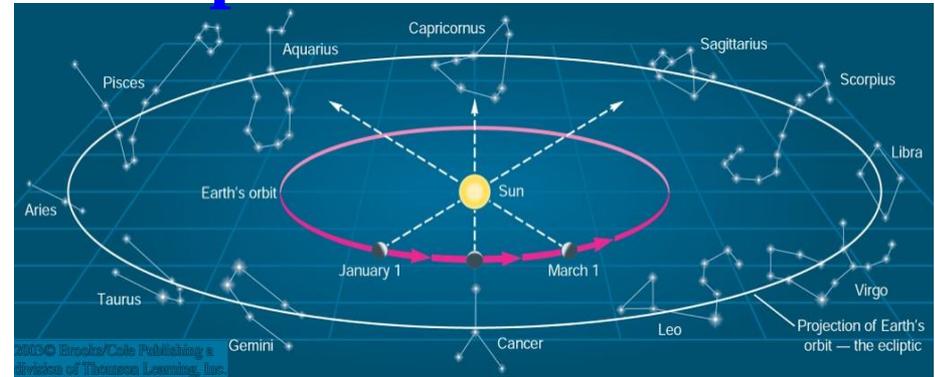
= **Schnittpunkt** von
Ekliptik und
Himmelsäquator an der
Himmelskugel

Standpunkt der Sonne am 21.3.
(Tag-und-Nacht-Gleiche)

-> Wegen Präzession und Nutation
der Erde **wandert Frühlingspunkt!**

-> Heute im **Sternbild Fische**. Bei
erstmaliger Berechnung
noch im Sternbild Widder
(alternativ: Widderpunkt) 

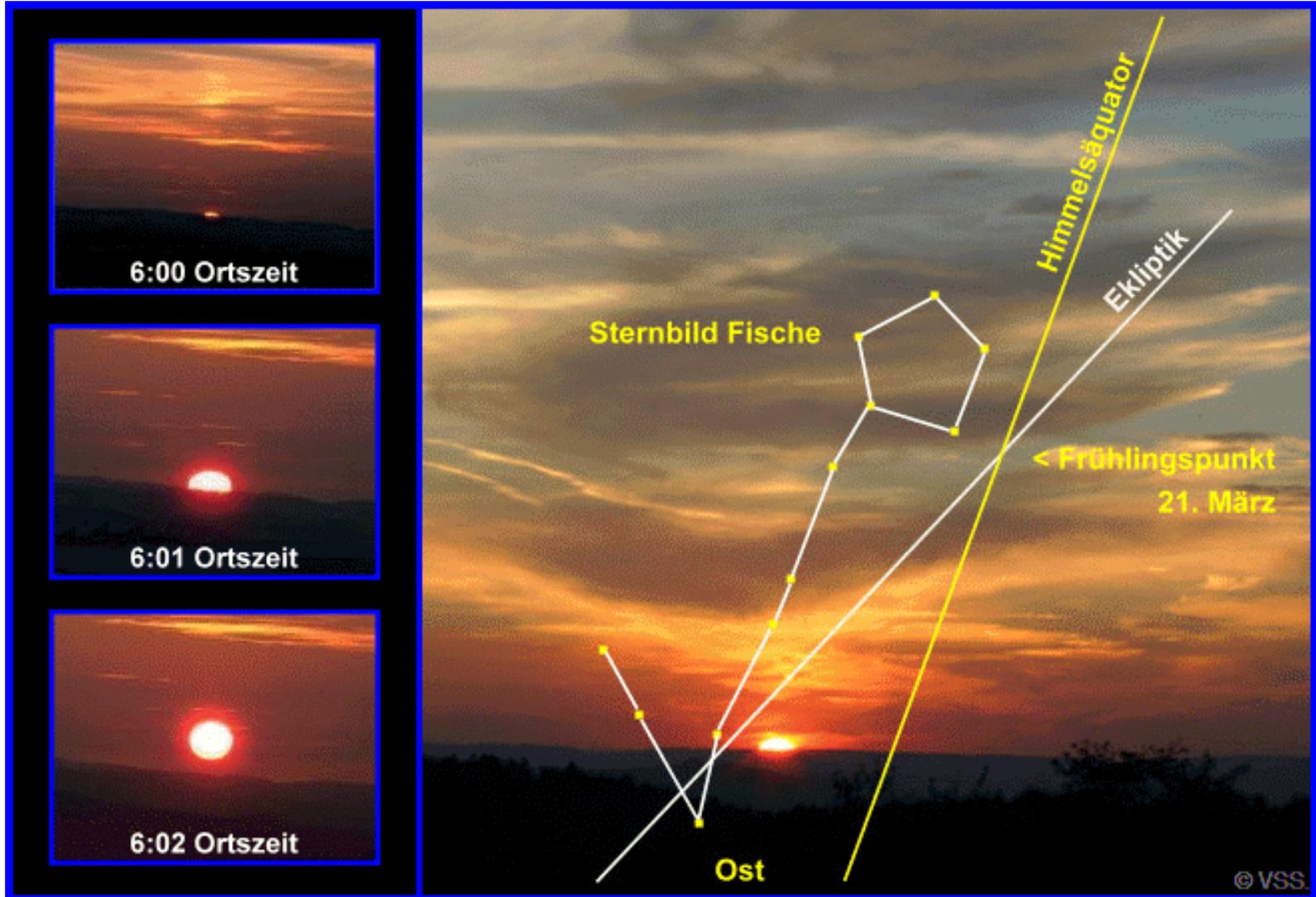
-> Engl: vernal equinox, spring equinox



2. 1 Positionen der Himmelskörper

-> Frühlingspunkt:

Sonnenaufgang 6:00 am 21.3.; Sonne steht am 21.3. im Frühlingspunkt



2.2 Himmelskoordinaten

Ekliptisches (ekliptikales) Koordinatensystem

- > Verwendung für Sonnensystem, Bedeckungen, etc.
 - **Grundkreis:** Ekliptik = scheinbarer Orbit der Sonne = Orbit der Erde = Linie der Bedeckungen (Eklipsen, griechisch: εκλιποις)
 - **Null-Längenkreis:** Großkreis durch Frühlingspunkt und ekliptischen Pol

Galaktisches Koordinatensystem

- > angepasst an Geometrie der Milchstraße (Galaxis)
- > Verwendung um Phänomene in der Galaxis zu lokalisieren
 - Grundkreis = Galaktischer Äquator = **Galaktische Ebene**
 - **Null-Längenkreis:** Großkreis durch Galaktische Pole und Zentrum der Galaxis (bis 1970: Großkreis durch Schnittpunkt mit Himmelsäquator und galaktischer Ebene)
 - Koordinaten:
 - Galaktische Länge l :** $0^\circ \dots + 360^\circ$, vom Galaktischen Zentrum nach Nord-Osten (rechts-händiges System)
 - Galaktische Breite b :** $- 90^\circ \dots + 90^\circ$

2.2 Himmelskoordinaten

System	Grundkreis	Nullpunkt / Bezugspunkt	Koordinaten
Horizontal	Horizont	Meridian	Azimut A Höhe h
Äquatorial (fest)	Äquator	Meridian	Stundenwinkel t Deklination δ
Äquatorial (beweglich)	Äquator	Frühlingspunkt	Rektaszension α Deklination δ
Ekliptikal	Ekliptik	Frühlingspunkt	Eklipt. Länge λ Eklipt. Breite β
Galaktisch	Galaktischer Äquator	Richtung zum galaktischen Zentrum	Galakt. Länge l Galakt. Breite b

Src: Max Camenzind

Achtung: “fest”: in Bezug auf Beobachter -> beweglich am Himmel
 “beweglich”: in Bezug auf Beobachter -> fest am Himmel
 Umrechnungshilfen siehe Appendix

2.1 Positionen der Himmelskörper

Veränderungen in den Sternpositionen

- > **Eigenbewegung** der Sterne,
“proper motion”, “PekuliARBewegung”
- > **Radialgeschwindigkeit**;
Änderung in der Entfernung
- > **Orientierung der Erde**:
Rotation, Präzession, Nutation
- > **Bewegung der Erde**:
Aberration, Parallaxe, (Erdbahn, Jahreszeiten)
- > **Erdatmosphäre**:
Refraktion

2.1 Positionen der Himmelskörper

Eigenbewegung (“proper motion”, “Pekuliarbewegung”)

Sterne befinden sich relativ zur Sonne nicht in Ruhe:

- > Zuerst bemerkt von E.Halley (1718): Vergleich von Sternpositionen mit Ptolemäus' Katalog: **Eigenbewegung** von 3 Sternen
- > Größte Eigenbewegung $\mu = 10.3''/\text{Jhr}$: **Barnards Pfeilstern**
- > **Jede “stellare” Position braucht eine Zeitangabe, zu der sie gemessen wurde**

-> Winkeländerung am Himmel: $\mu_\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, $\mu_\delta = \delta_1 - \delta_2$

Eigenbewegung in Rektaszension: $\mu_\alpha^x = \mu_\alpha \cos \delta$

Eigenbewegung in Deklination: $\mu_\delta^x = \mu_\delta$

Total: $\mu = (\mu_\alpha^2 \cos^2 \delta + \mu_\delta^2)^{1/2}$

2.1 Positionen der Himmelskörper

Eigenbewegung, “Proper motion”

Veränderung der Sternbilder

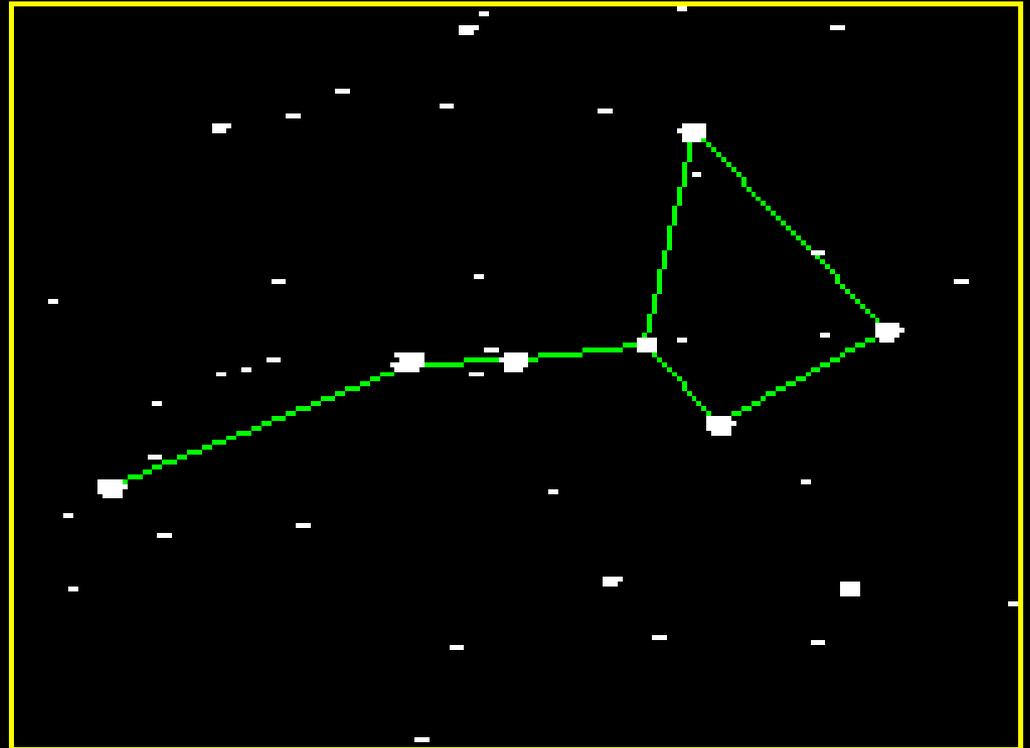
Beispiel:

Großer Wagen:

Pekuliarbewegung
der Sterne
von 100000 v.Chr.
bis 100000 n.Chr.

*(copyright Pogge,
Ohio State)*

100000 BC



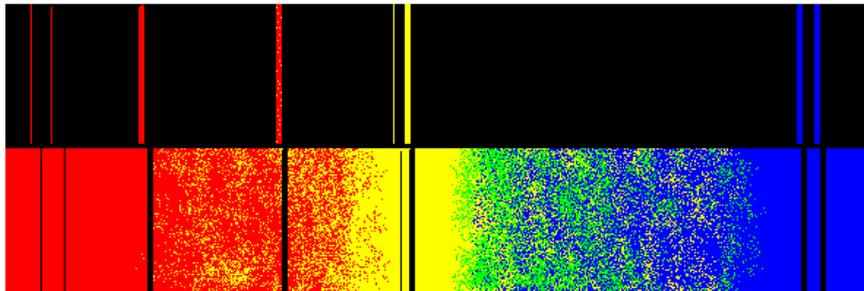
2.1 Positionen der Himmelskörper

Radialgeschwindigkeit der Sterne:

= Geschwindigkeitskomponente entlang der "Sichtlinie"

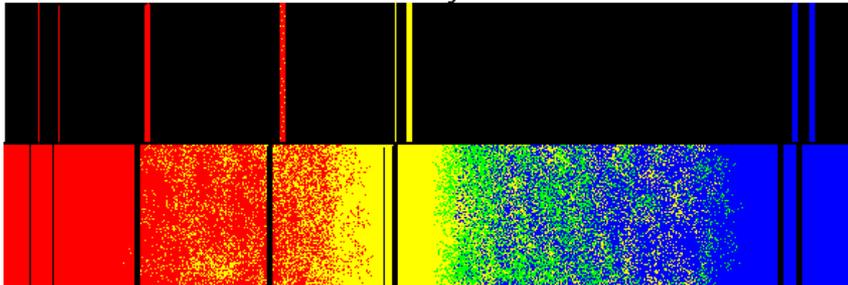
-> beobachtbar durch Doppler-Verschiebung von Spektrallinien
(zum Beobachter hin / von ihm weg)

Reference lines from laboratory source



Absorption lines from star

Reference lines from laboratory source



Absorption lines from star

Relativistischer Dopplereffekt:

(kein ruhendes "Medium", z.B. Luft)

$$\lambda_{beob} = \lambda_{ruhe} \sqrt{\frac{1 + v_r/c}{1 - v_r/c}}$$

$$z = \frac{\lambda_{beob} - \lambda_{ruhe}}{\lambda_{ruhe}} \equiv \frac{\Delta \lambda}{\lambda_{ruhe}}$$

$$\frac{v_r}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \simeq z, \quad f. \quad z \ll 1$$

2.1 Positionen der Himmelskörper

Eigenbewegung, Radialgeschwindigkeit und Parallaxe von Sternen:

-> nahe Sterne haben die größten Werte ("mas" = milli-Bogensekunde)

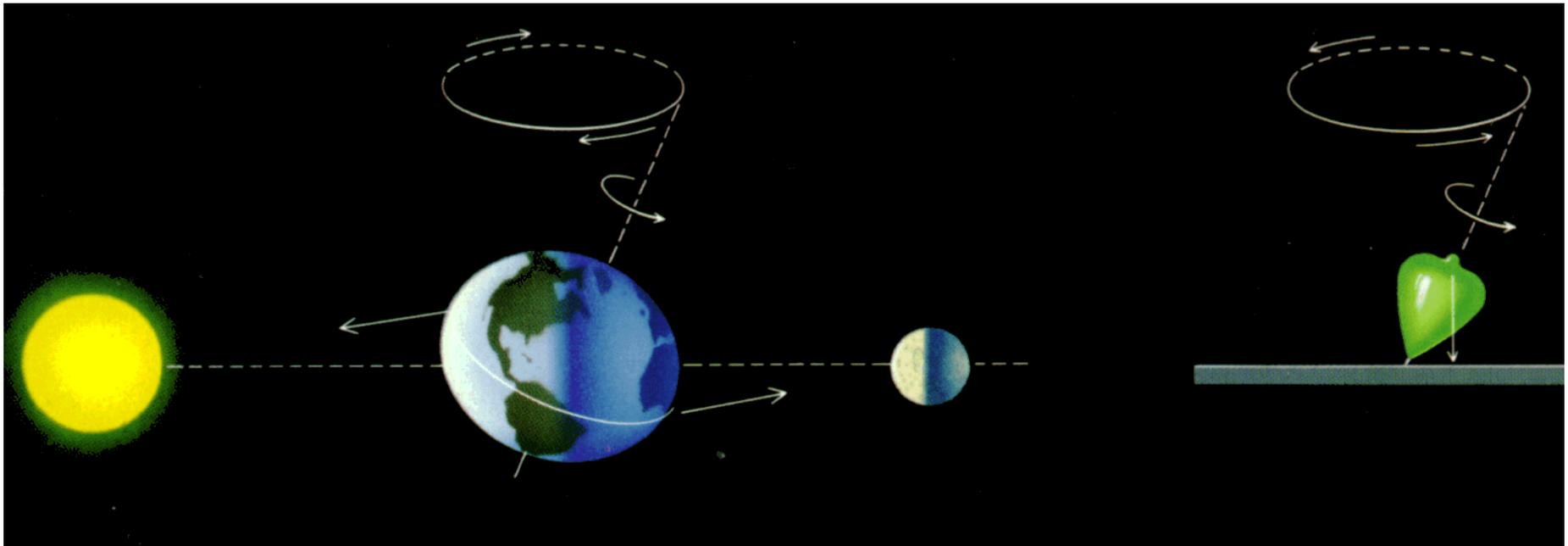
#	Stern	Eigenbewegung μ		Radialgeschwindigkeit (km/s)	Parallaxe (mas)
		$\mu_\alpha \cdot \cos \delta$	μ_δ		
		(mas/yr)	(mas/yr)		
1	Barnard's star	-798.71	10337.77	-106.8	549.3
2	Kapteyn's star	6500.34	-5723.17	245.5	255.12
3	Groombridge 1830	4003.69	-5814.64	-98	109.22
4	Lacaille 9352	6766.63	1327.99	9.7	303.89
5	Gliese 1	5633.95	-2336.69	23.6	229.32
6	HIP 67593	2282.15	5369.33		76.2
7	61 Cygni A & B	4133.05	3201.78	-64.3	287.18
8	Lalande 21185	-580.46	-4769.95	-85	392.52
9	Epsilon Indi	3961.41	-2538.33	-40.4	275.79

(Quelle wiki)

2.1 Positionen der Himmelskörper

Präzession der Erde im Gravitationsfeld Sonne/Mond

- Erde **abgeplattet**, "Wulst" von 21 km, gekippt um $23^{\circ}.5$
- **Gezeitenkräfte** von Sonne & Mond -> **Drehmoment** -> versucht Erdachse aufzurichten -> Präzessionsbewegung (Kreisel)
- **Himmelspole** wandern über den Himmel, **Frühlingspunkt** wandert
 - ★ Periode: 25,725 Jhr = $50''.3878$ /Jhr
 - ★ Relation von Jahreszeiten und Tierkreiszeichen ändern sich
 - ★ Entdeckt: 129 v. Chr. v. Hipparchos, (Babylonier ?)



2.1 Positionen der Himmelskörper

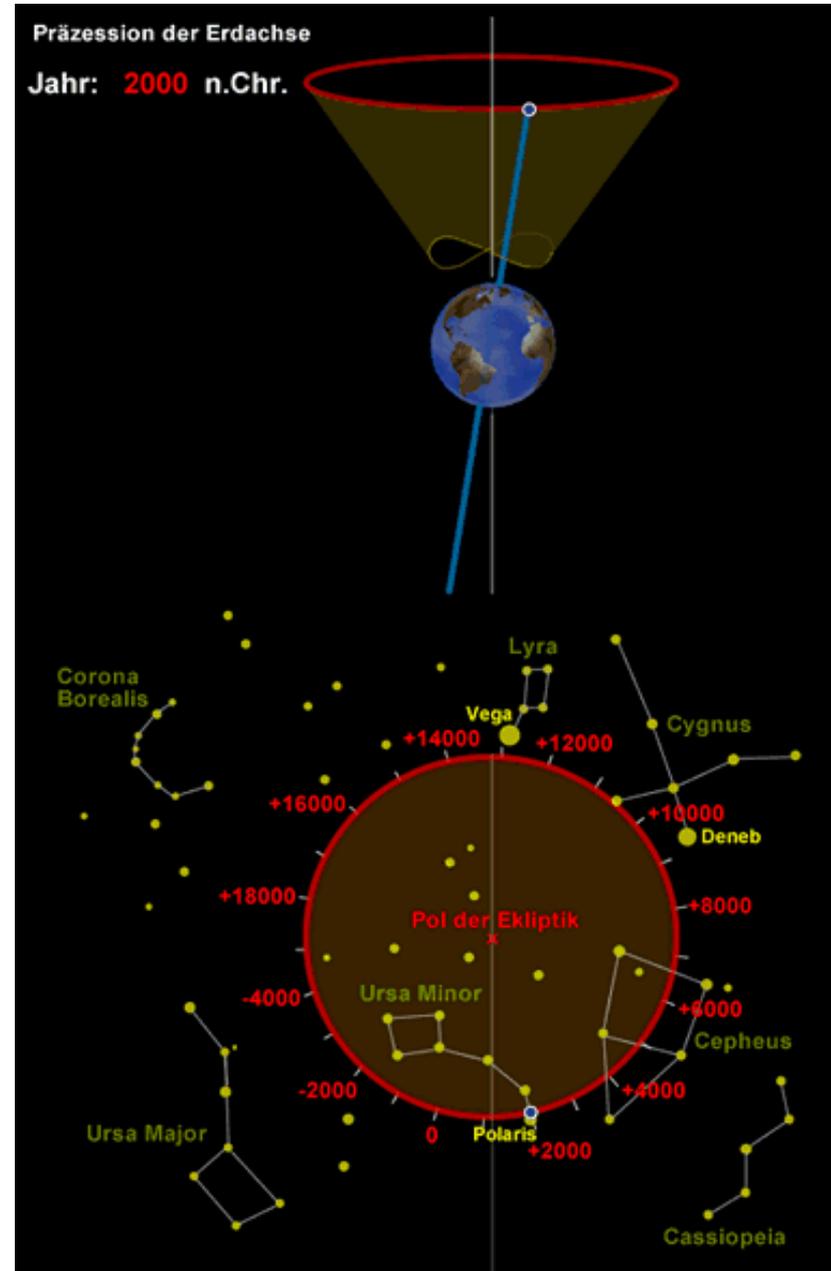
Präzession der Erde

rotierende Erde bewegt sich als Kreisel

-> Erdachse zeigt in verschiedene Richtungen am Sternenhimmel (zur Zeit auf Polarstern Polaris)

-> Bewegung des Himmelspols durch Kreiselbewegung der Erdachse:

-> die nächsten Pol-Sterne:
Iota Cep (in 4300 Jhr),
Deneb (in 8000 Jhr),
Wega (in 11000 Jhr),
Polaris (in 25,800 Jhr,
aber Eigenbewegung)

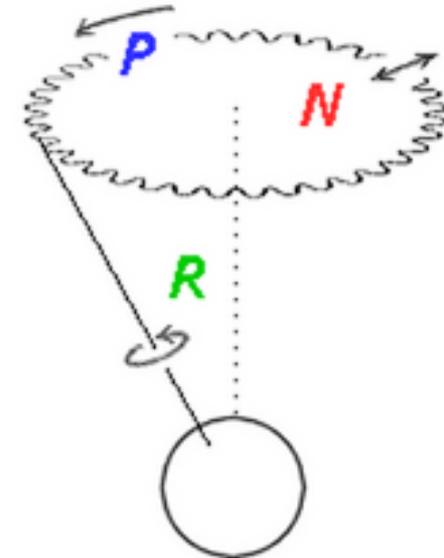


2.1 Positionen der Himmelskörper

Nutation: Störung der Präzessionsbewegung

- Grund: **nicht konstante Drehmomente** der Gezeiten auf Erdwulst wegen:
 - > Bahnneigung des Mondes
 - > Eliptizität von Erd und Mondbahn
- **Periode: 18.6 Jahre**
- Effekte:
 - ★ Verschiebung der Bahnknoten (Schnittpunkte)
 - ★ Jahreszeitliche Verschiebung der Bedeckungen / Finsternisse
 - ★ **Längennutation** (Verschiebung des Frühlingspunktes)
 - ★ “**Schiefen**”**nutation** (Inklination der **Ekliptik**)

R: Rotation
N: Nutation
P: Präzession

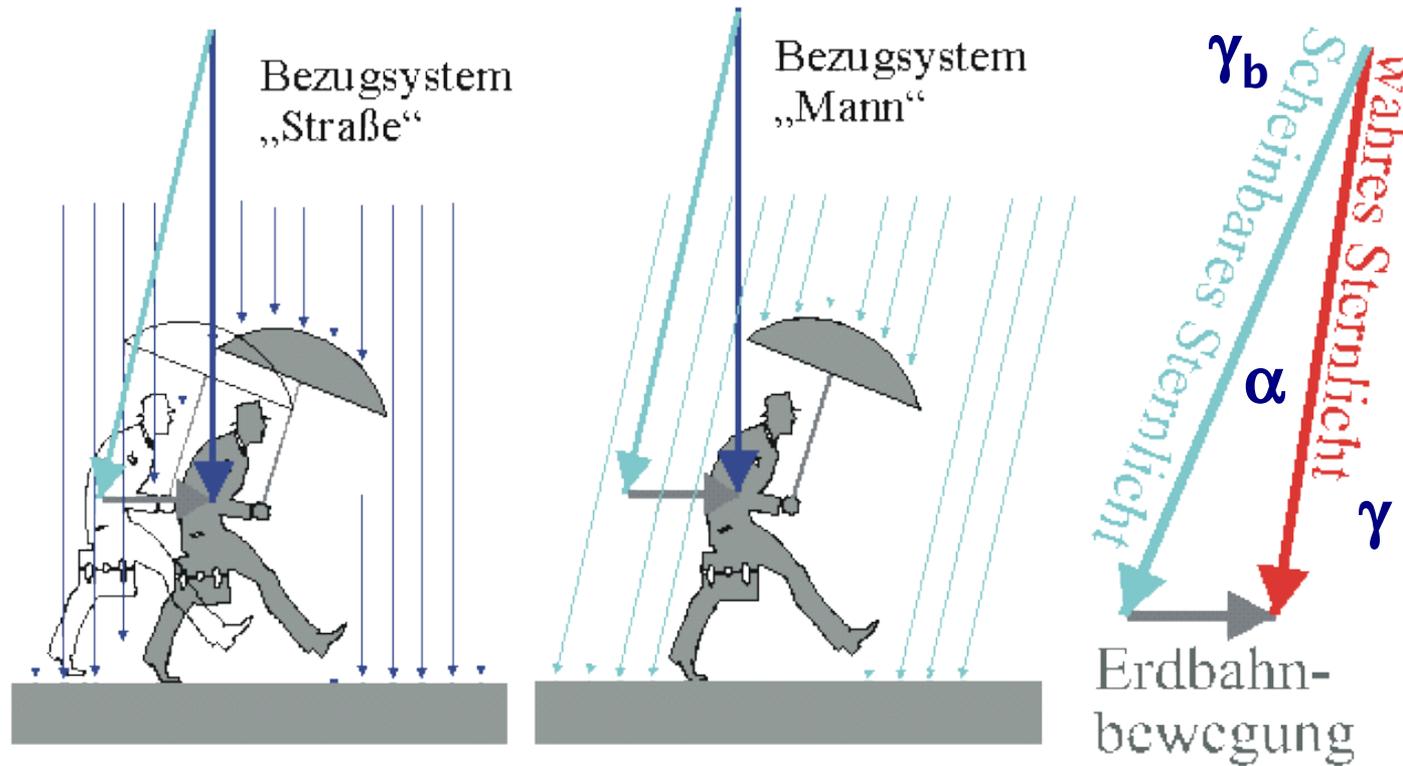


Entdeckt: 1728 von James Bradley

<http://en.wikipedia.org/wiki/Nutation>

2.1 Positionen der Himmelskörper

Aberration: Lichteinfallrichtung variiert wegen Erdbewegung



[www.leifiphysik.de]

Abberationswinkel: größter Winkel wenn Licht senkrecht einfällt
= Abberationskonstante, $\alpha_{\max} = v_{\text{Erde}} / c$ (nichtrelativistisch)

2.1 Positionen der Himmelskörper

Aberration:

Lichteinfallrichtung variiert durch Bewegung des Beobachters

Hier: Bewegungskomponenten der Erde

- 0.5 km/s Rotationsgeschw. am Äquator
- 30 km/s Bahngeschw. Erde um Sonne
- 10 km/s Eigengeschw. der Sonne in Galaktischer Scheibe
- 220 km/s Bahngeschw. der Sonne in Galaxis
- einige 100 km/s Eigengeschw. der Galaxis

Gleichungen in **nicht-relativistische Näherung**:

$$\beta \equiv \frac{v}{c} \ll 1, \quad \alpha \simeq \beta \sin \gamma, \quad \alpha \ll \gamma$$

wirkl. Winkel = γ , beob. Winkel = γ_b , Differenz = $\alpha = \gamma_b - \gamma$

für Erde (jährlich) : $\beta = 10^{-4}$, $\alpha_{max} = 10^{-4} = 20.5 \text{ asec}$

Werte für die **Aberrationskonstante** κ mit $\alpha ['] \simeq \kappa \sin \gamma$

täglich: $0''.32 \cos \varphi$, jährlich: $20''.6$, Galaktisch: $150''$ ($2 \cdot 10^8 \text{ yr}$)

2.1 Positionen der Himmelskörper

Stern-Parallaxe:

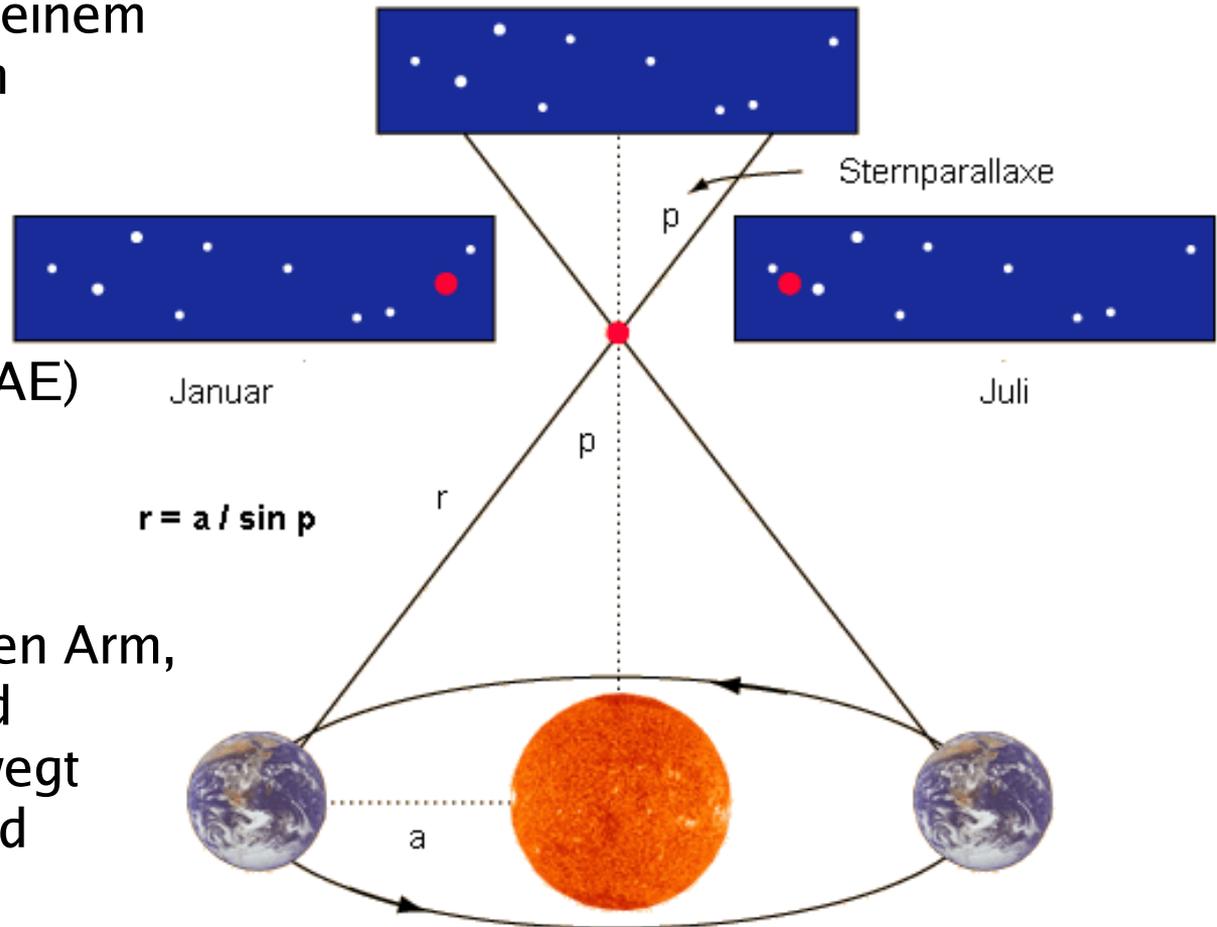
Scheinbare Positionsänderung durch Erdbahnbewegung:

Sternposition wird nach einem halben Jahr unter einem anderen Winkel beobachtet:

Erdposition hat sich um 2×150 Mio. km (=2 AE) verschoben

Veranschaulichung:

Finger am ausgestreckten Arm, ein Auge abwechselnd schliessen, Finger bewegt sich gegen Hintergrund



2.1 Positionen der Himmelskörper

Stern-Parallaxe: Veranschaulichung: Finger am ausgestreckten Arm, ein Auge abwechselnd schliessen



Webseite, bei der Karten von Sternbildern erstellt werden können:
<http://ephemeriden.com/charts.py>

2.1 Positionen der Himmelskörper

Parallaxe: Nahe Sterne werden auf verschiedene Positionen am Himmelshintergrund projiziert, wenn sich die Beobachterposition verändert

-> Erdbahn -> jährliche **Parallaxe π**

$$\pi \equiv \alpha \simeq \sin \alpha = \frac{a}{R}$$

a = Abstand Erde-Sonne = 150 Mio km
(=1 AE, astronomische Einheit)

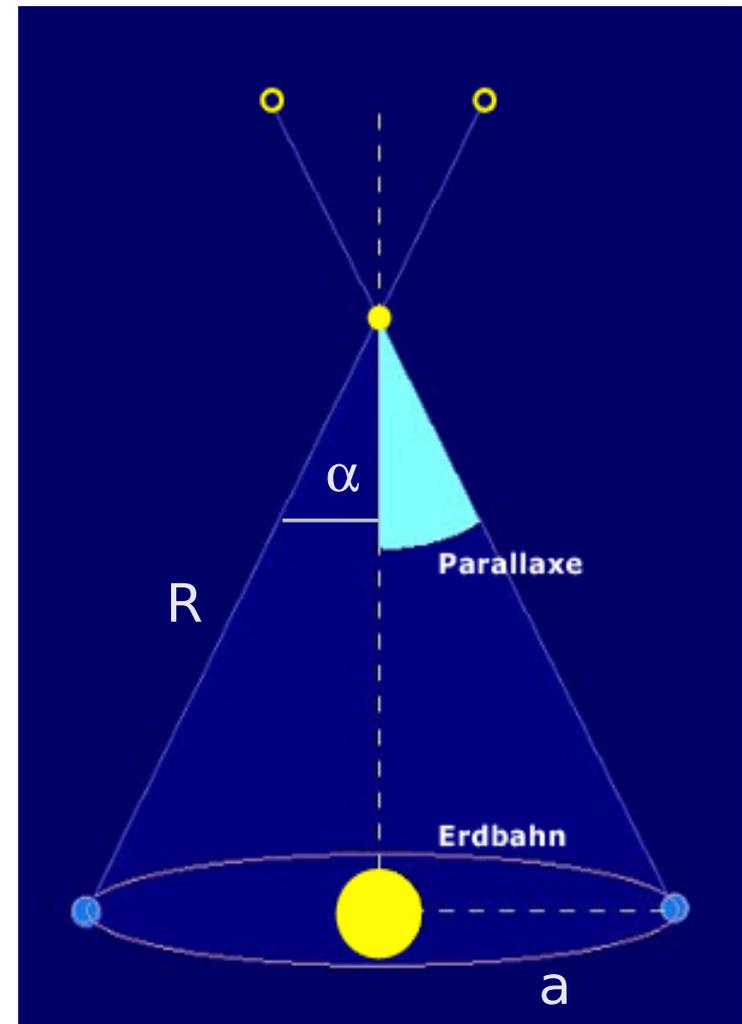
R = Abstand des Sterns

π [Bogengrad] = a / R

π ["] = $1 / R$ [pc]

-> **Definition: "parsec", pc**

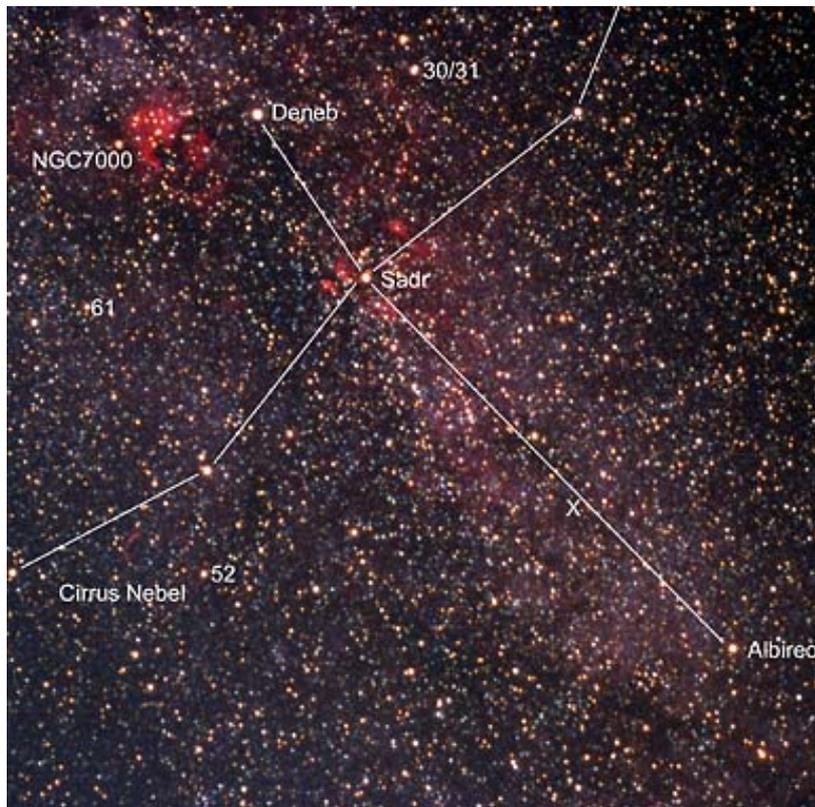
$$1\text{pc} = 206,265\text{AE} = 3.26L_j$$



2.3 Entfernungsbestimmung durch Parallaxe

1. genaue Parallaxenmessung

- > Friedrich Wilhelm **Bessel** (1838):
61 Cygni (damals größte Eigenbewegung)
- > Parallaxe = 0.31''
- > Entfernung: $(1/0.31) \text{ pc} = 3.2 \text{ pc} \approx 11 \text{ Lj}$



2.3 Entfernungsbestimmung durch Parallaxe

Parallaxe:

fundamental(st)e Methode zur Entfernungsbestimmung!

$$\pi \equiv \alpha \simeq \sin \alpha = \frac{a}{R}$$


Vergleiche:

Parallaxe des **nächsten Sterns** (Proxima Centauri, 4 Lj):

(0.7687 ± 0.0003) Bogensekunden = 2cm Abstand in 5km Entfernung

Hipparcos-Satellit (1989): Genauigkeit: 10 mas (milli-Bogensekunden)

-> Parallaxen bis zu 1,600 Lj Distanz für > 100,000 Sterne

BeSSel-Radioteleskope (2009): Interferometrie, Genauigkeit ~10 μas

Gaia-Satellit (2013): Genauigkeit: 10 μas

-> Parallaxen bis einige 10,000 Lj (d.h. alle Sterne der Milchstrasse)

Alle weiteren Entfernungsmessungen bauen auf Parallaxe auf!

2.3 Entfernungsbestimmung durch Parallaxe

Entfernung der Sterne:

Sonnenumgebung: die 26 nächsten Sterne:

Gebäuchlicher Name	wiss. Name	Entfernung (Lichtjahre)	Gebäuchlicher Name	wiss. Name	Entfernung (Lichtjahre)
Sonne		8 Lichtminuten			
Proxima Centauri	V645 Cen	4.2	Ross 128	Epsilon Eri	10.8
Rigel Kentaurus	Alpha Cen A	4.3			10.9
	Alpha Cen B	4.3		61 Cyg A	11.1
Barnard's Star		6.0		61 Cyg B	11.1
Wolf 359	CN Leo	7.7		Epsilon Ind	11.2
	BD +36 2147	8.2		BD +43 44 A	11.2
Luyten 726-8A	UV Cet A	8.4	Luyten 789-6	BD +43 44 B	11.2
Luyten 726-8B	UV Cet B	8.4	Procyon A	Alpha CMi A	11.4
Sirius A	Alpha CMa A	8.6	Procyon B	Alpha CMi B	11.4
Sirius B	Alpha CMa B	8.6		BD +59 1915 A	11.6
Ross 154		9.4		BD +59 1915 B	11.6
Ross 248		10.4		CoD -36 15693	11.7

2.1 Positionen der Himmelskörper

Eigenbewegung, Radialgeschwindigkeit und **Parallaxe von Sternen:**

-> nahe Sterne haben die größten Werte ("mas" = milli-Bogensekunde)

#	Stern	Eigenbewegung μ		Radial- geschwindigkeit	Parallaxe
		$\mu_{\alpha} \cdot \cos \delta$	μ_{δ}		
		(mas/yr)	(mas/yr)	(km/s)	(mas)
1	Barnard's star	-798.71	10337.77	-106.8	549.3
2	Kapteyn's star	6500.34	-5723.17	245.5	255.12
3	Groombridge 1830	4003.69	-5814.64	-98	109.22
4	Lacaille 9352	6766.63	1327.99	9.7	303.89
5	Gliese 1	5633.95	-2336.69	23.6	229.32
6	HIP 67593	2282.15	5369.33		76.2
7	61 Cygni A & B	4133.05	3201.78	-64.3	287.18
8	Lalande 21185	-580.46	-4769.95	-85	392.52
9	Epsilon Indi	3961.41	-2538.33	-40.4	275.79

(Quelle wiki)

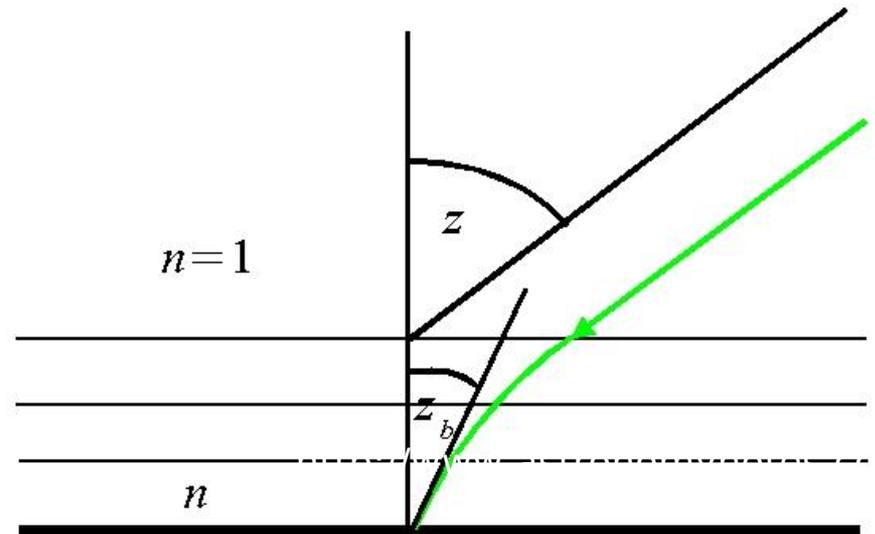
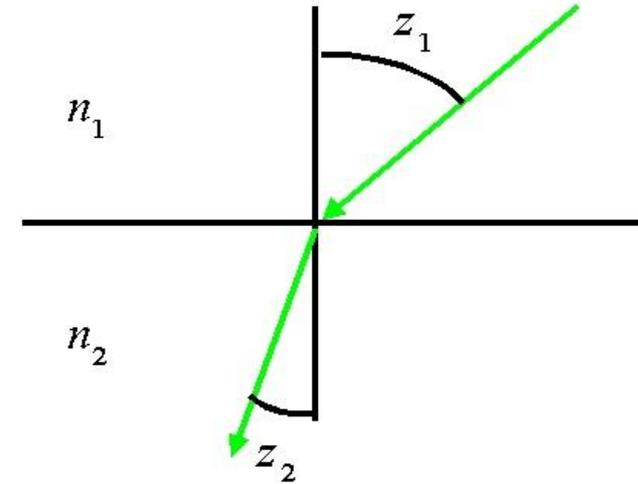
2.1 Positionen der Himmelskörper

Refraktion - Brechung des Sternlichts in der Atmosphäre

- **Snelius** Brechungsgesetz: $n_i \sin z_i = \text{const.}$
- z = wahre Zenit-Distanz
- z_b = beobachtete Zenit-Distanz
- n = Brechungsindex
- Luft, Meereshöhe $\rightarrow n - 1 = 0.00029$
- **Refraktion:** $R = z - z_b$

$$\rightarrow R \simeq (n - 1) \tan z_b$$

$z[^\circ]$	$\tan z$	$R[']$
10	0.18	0.18
45	1	1
85	11.4	10
89.5	115	29
90		35



2.4 Zeit, Zeitmessung

Zeitdefinitionen: verknüpft mit Koordinatensystem & Erdbewegung

Traditionell: Alltag durch **Sonnenstand** bestimmt:

-> **“Wahre Sonnenzeit”**: Stundenwinkel der Sonne + 12h; **z.B. Sonnenuhr**

Problem: Bahnbewegung der Erde ungleichförmig

-> **“Wahre Sonnenzeit”** ändert sich über das Jahr

-> Lösung: **“Mittlere Sonnenzeit”**:

Annahme eines scheinbar gleichförmigen Erdbahnumlaufs

-> **Zeitgleichung** = Wahre Sonnenzeit - Mittlere Sonnenzeit

-> Sonnenzeit abhängig vom Längengrad: MEZ für 15°O

-> **Weltzeit** (universal time) UT: mittl. Sonnenzeit von Greenwich

Achtung: Sternzeit θ : Stundenwinkel t des Frühlingspunktes
(also die R.A. der Sterne, die gerade im Meridian stehen)

Die **“mittlere Sonne”** bewegt sich durch die Ekliptik,
bewegt sich also gegenüber dem Frühlingspunkt

-> **Sternzeituhr geht der mittleren Sonne (MEZ, UT) um 2h/Monat vor**
(entspricht 24h / 365, bzw. 3 min 56s / Tag)

2.4 Zeit, Zeitmessung

Zeitgleichung:

Zwei periodische Korrekturen: 2 Perioden, Offset

1) Inklination der Ekliptik

- > 6-Monate Periode
- > Winkelgeschwindigkeit der Sonne schneller, wenn sie parallel zum Himmelsäquator läuft
- > kleinste Winkelgeschwindigkeit bei Tag-und-Nacht-Gleichen

2) Exentrität der Erdbahn

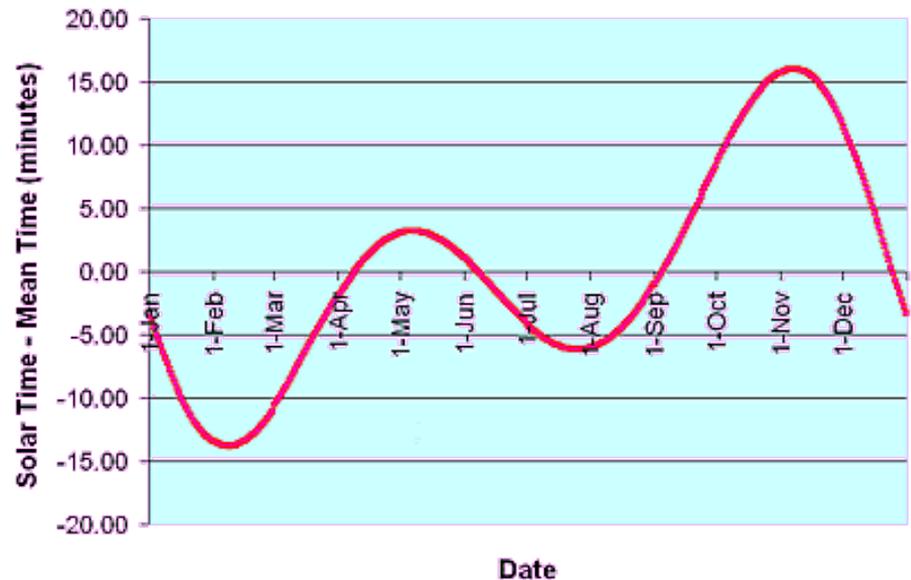
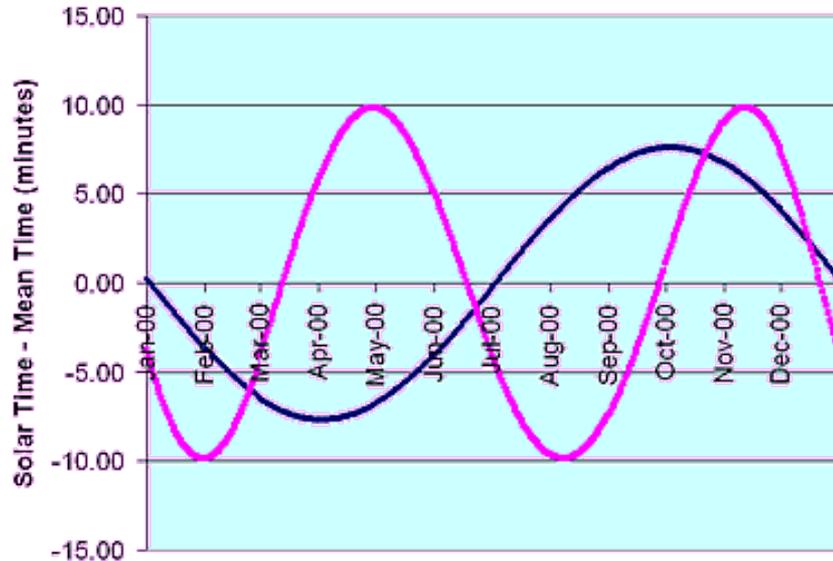
- > 12-Monate Periode
- > Winkelgeschwindigkeit der Sonne schneller bei Erdnähe zur Sonne (2. Kepler-Gesetz)
- > schnellste Bewegung am Perizentrum (3. Januar)

Beide Korrekturen können durch **sinus-Funktionen** angenähert werden

2.4 Zeit, Zeitmessung

Beiträge zur Zeitgleichung:

- > Inklination der Ekliptik (rosa)
- > Exzentrizität der Erdbahn (dunkelblau)



2.4 Zeit, Zeitmessung

Zeitgleichung - Beispiele:

1) Ortszeit an verschiedenen Längengraden λ :

$$\text{Ortszeit}_B[h] = \text{Ortszeit}_A[h] + \frac{\lambda_B[^\circ] - \lambda_A[^\circ]}{15}$$

$$\text{Ortszeit}_B[h] = \text{Weltzeit}[h] + \frac{\lambda_B[^\circ]}{15}$$

2) Zeitgleichung für Heidelberg, $8^\circ 42'$ östl.L., 24.10, mittags = Sonne im Meridian

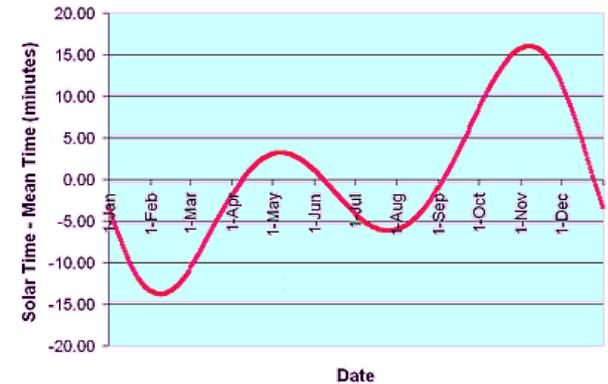
-> Zeitgleichung = wahre - mittlere Zeit:

$$+15^m = 12^h - (\text{MEZ} - 25^m) \quad \text{MEZ} = 12^h + 25^m - 15^m = 12^h 10^m$$

$$\text{Zeitgleichung}[min] = \text{WOZ}[h] - \text{MEZ}[h] + (15^\circ - \lambda_{\text{östlich}}[^\circ]) 4 \text{ min}/^\circ$$

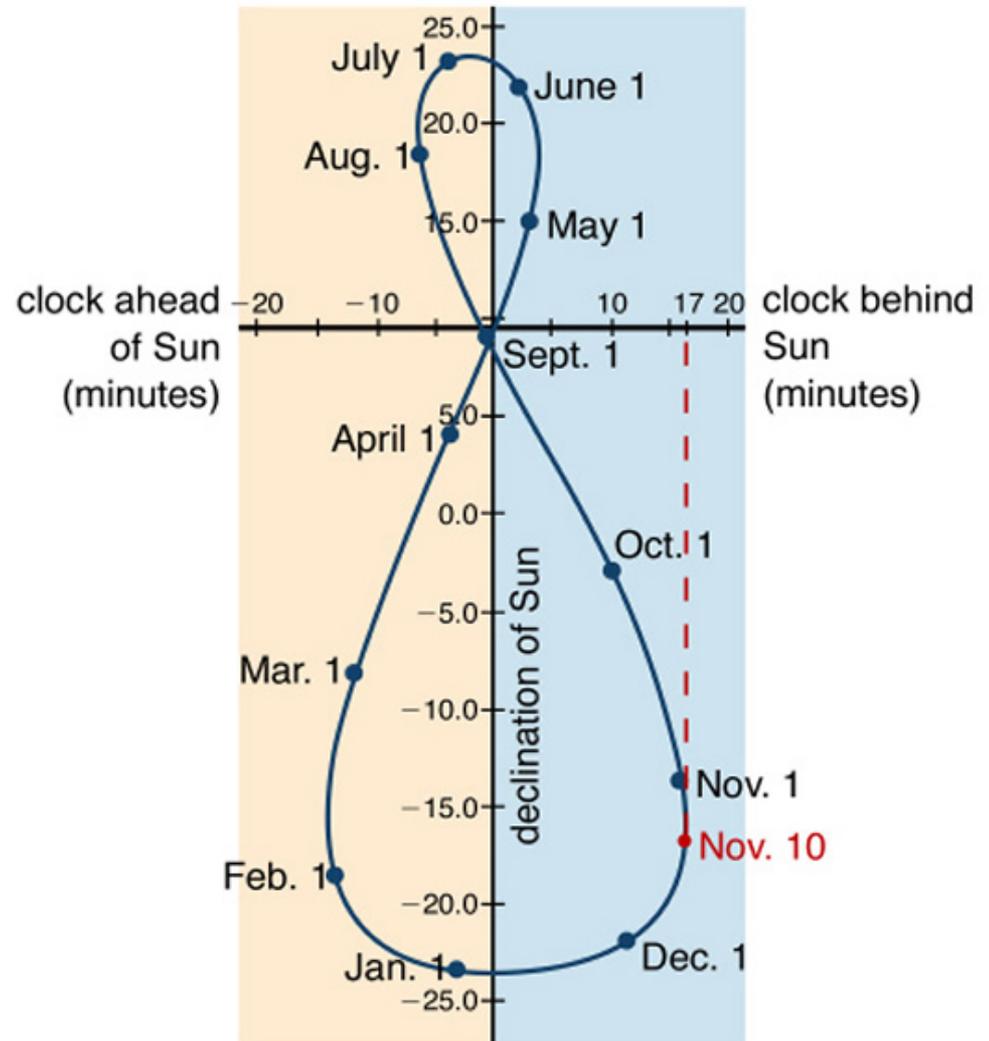
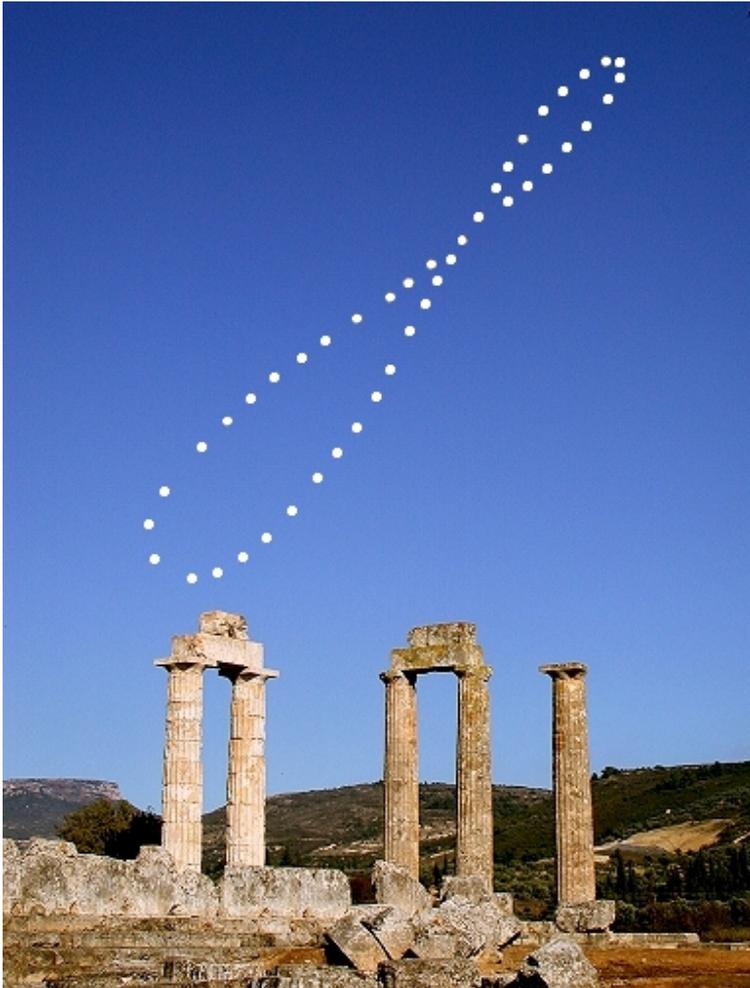
$$\text{Zeitgleichung}[min] = \text{WOZ}[h] - \left[\text{MEZ}[h] - \frac{(15^\circ - \lambda_{\text{östlich}}[^\circ])}{15} h \right] 4 \text{ min}/^\circ$$

$$\text{MEZ}[h] = \text{WOZ}[h] + (15^\circ - \lambda_{\text{östlich}}[^\circ]) 4 \text{ min}/^\circ - \text{Zeitgleichung}[min]$$



2.4 Zeit, Zeitmessung

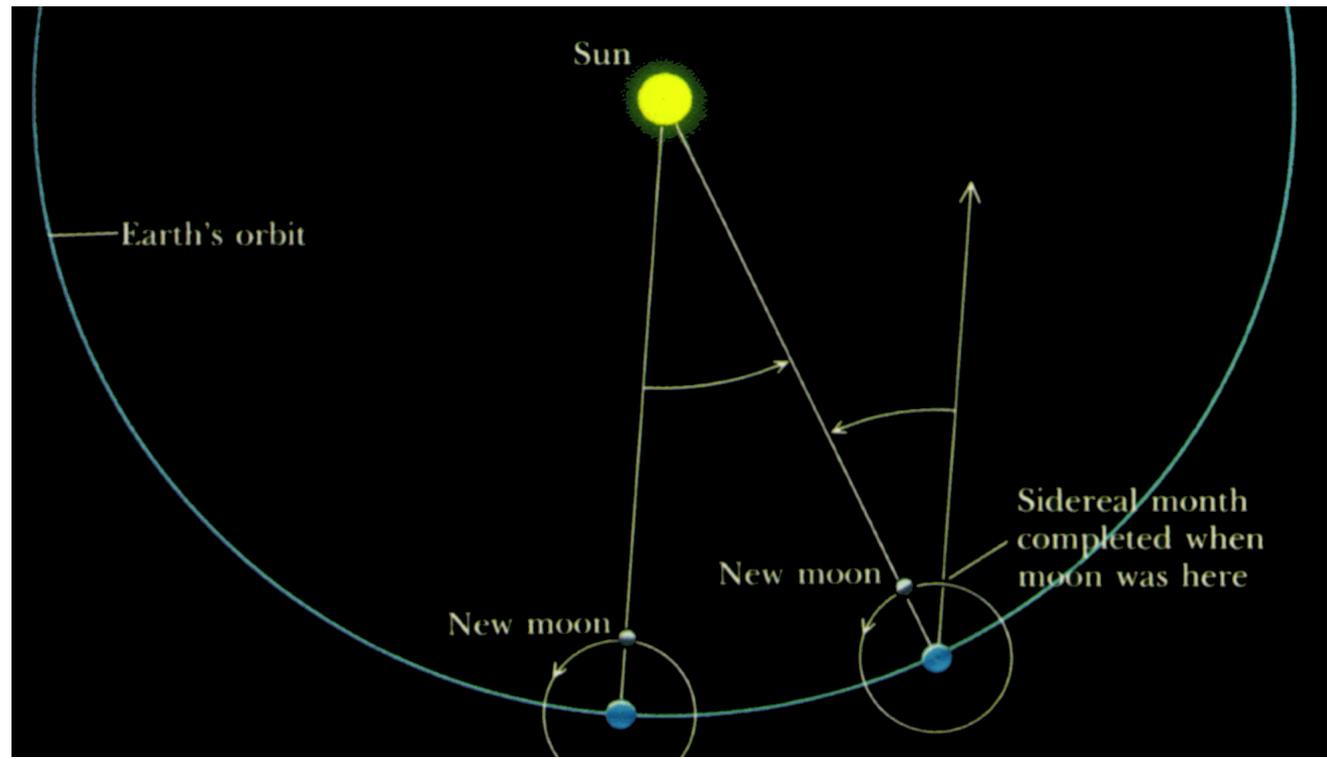
Analemma: Sonnenposition zu Mittag



2.4 Zeit, Zeitmessung

Definitionen der Monatslänge:

- **Sidrischer Monat:** Mond kehrt zur selben Position relativ zu den Fixsternen zurueck (Latein: *sidus*):
27.321661 Tage (27 d 7 h 43 min 11.5 s) oder $\sim 27 \frac{1}{3}$ Tage
- **Synodischer Monat:** von Neumond zu Neumond:
29.530588 Tage (29 d 12 h 44 min 2.8 s), oder $\sim 29 \frac{1}{2}$ Tage
- noch andere Definitionen (s. Appendix)



2.4 Zeit, Zeitmessung

Definitionen der Jahreslänge:

abhängig von Erdbahnparametern (bzw. scheinbarer Sonnenbahn):

- Tropisches Jahr:

Mittlere Zeit zwischen dem Erreichen der Sonne auf demselben Längengrad: $365^{\text{d}}5^{\text{h}}48^{\text{m}}46^{\text{s}}$ (Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt)

- Sidirisches Jahr:

Wahre Zeitdauer des Umlaufs der Erde um die Sonne (länger wegen Präzession): $365^{\text{d}}6^{\text{h}}09^{\text{m}}10^{\text{s}}$ (von Fixstern zu Fixstern)

- Anomalistisches Jahr:

Zeitdauer von Perihelion zu Perihelion: $365^{\text{d}}6^{\text{h}}13^{\text{m}}53^{\text{s}}$

- Julianisches Jahr:

berücksichtigt 4-Jahres-Zyklus von Schaltjahren: $365^{\text{d}}6^{\text{h}}$

- Gregorianisches Jahr:

★ aktueller westlicher Kalender, **bürgerliches Jahr** = $365 + 1/4 - 3/400$ Tage = $365^{\text{d}}5^{\text{h}}49^{\text{m}}12^{\text{s}}$

★ 26s zu lang = 1 Tag in 3300 Jahren

2.4 Zeit, Zeitmessung

“Christliche” Zeitrechnung, Kalender:

- bis 1.10.1582 **Julianischer Kalender**, dann 10-Tage-Sprung, um angelaufene Schaltjahre zu kompensieren
- seit 11.10.1582 **Gregorianischer Kalender**
(Schaltvorschrift von Papst Gregor XIII)
- **kein Jahr "0"**: astron.-> historisch: Jahr 0 = 1 v.Chr, Jahr -1 = 2 v.Chr

Diese **Kalenderjahre** sind für astronomische Messungen von Zeitdifferenzen wegen ungleicher Jahres-, Monatslängen, Datumssprüngen **unbrauchbar**

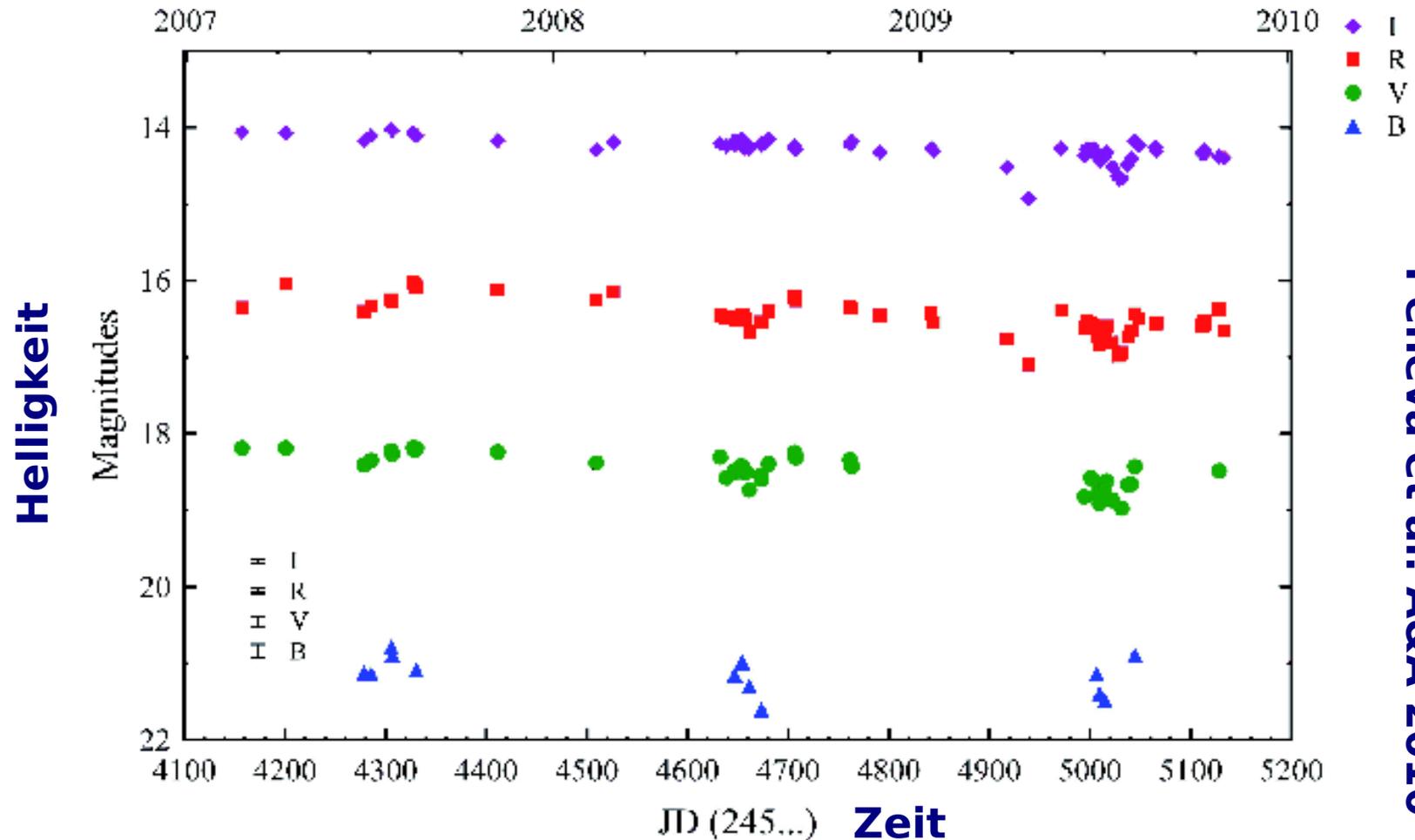
Daher: **Julianisches Datum JD**:

- **kontinuierliche Zählung** der Tage, Beginn mittags (1581 Scaliger)
- Nullpunkt: **1. Jan. 4713v.Chr**
- **MJD** = Modified Julian Day -> kleinere Zahlen (Beginn Mitternacht)
17 Nov. 1858 0^h = 2400000.5 JD = 0.0 MJD
- Julianischer Tag = 86400 s

2.4 Zeit, Zeitmessung

Julianisches Datum JD:

Beispiel: "Lichtkurve" des FU Orionis Sterns V733 Cephei



2.4 Zeit, Zeitmessung

Physikalisch festgelegte Zeitkoordinaten:

- > **Geschichtlich:** Uhreneinstellung durch Beobachtung der Sterne, also Erdrotation als Zeitmaßstab (astronomische Zeitmessung)
 - > Definition: Eine **Sekunde** = $1/86400$ des mittleren Sonnentages
 - > Fluktuationen in der Erdrotation nicht meßbar mit **Pendeluhr**
- > Problem der Erde als **nicht-einheitliche Uhr** schon Ende des **19. Jhdts** bekannt durch Beobachtungen von Mond, Merkur & Venus
- > **Heute:** Quartz- & **Atom-Uhren** genauer als Erdrotation: **“Atomzeit” TAI**
 - > Messung von irregulären, periodischen und langfristigen Änderungen der Erdrotation möglich

Anzahl **verschiedener Zeitsysteme** verwirrend

- > entstanden durch folgende Gegebenheiten:
 - > **Irreguläre Rotation** der Erde
 - > Zunehmende **Genauigkeit von Uhren**
 - > Kompatibilität mit spezieller und allgemeiner **Relativitätstheorie**
 - > Kontinuität mit **geschichtlicher** Entwicklung

2.4 Zeit, Zeitmessung

Internationale Atom-Zeit = TAI:

- Atomuhren seit 1955 äußerst präzise
- 1972: Vergleich vieler Atomuhren internationaler Institutionen
-> Vergleich erfordert Berücksichtigung relativistischer Effekte (Meereshöhe, versch. Geschwindigkeiten bei verschiedenen Breiten, ...)
- Heutige Genauigkeit: 10^{-14} , also 1s in 3 Mio Jahren
- TAI = UT zu Beginn von 1958
- **SI Einheit:** 1s = 9192631770 Oszillationen des Cs^{133} Hyperfein-Struktur-Übergangs (magnetische Kopplung) in den Grundzustand

Ephemeriden-Zeit = ET: (Ephemeriden = tabell. Positionen astron. Objekte)

- Variation der Erdrotation erfordert Definition einer physikalischen Zeiteinheit: Jahrelang benutzt für Ephemeriden im Sonnensystem
- Abweichungen von UT können nur nachträglich bestimmt werden
- **Nullpunkt:** ET = UT am 0th Januar 1900, 12h
Ephemeriden-Sekunde = $1/31556925.9747$ eines tropischen Jahres
- Zu Beginn 1958: ET = TAI + 13.138 s definiert

2.4 Zeit, Zeitmessung

Terrestrische Zeit = TT

- > TAI = gleichförmige, physikalische Zeit
 - > einfacher zu realisieren, praktischer als ET
 - > TT definiert (IAU 1976) als **Fortsetzung der ET:**
 - $TT = \text{Terrestrial Time} = ET$ (vor 1960)
 - $= TAI + 32.184 \text{ s}$ (nach 1960).
- > dynamische Zeit, bezogen auf Erdoberfläche, entspricht der **“Eigenzeit“** einer Uhr auf dem **Erd-Geoid**
- > $TT = UTC + \text{Schaltsekunden} + 10 \text{ s} + 32.184 \text{ s}$

Barycentric Coordinate Time = TCB

- > relativistisch gibt es **keine absolute Zeit**
- Zwei ideale Uhren an verschiedenen Orten mit verschiedenen Geschwindigkeiten / verschiedener Schwerkraft messen verschiedene Zeitintervalle
- > **TCB bezogen auf Schwerkraftzentrum des Sonnensystems**
- > wird jetzt auch für Ephemeriden verwendet

2.4 Zeit, Zeitmessung

Angabe von vier Koordinaten in der Astronomie

- IAU (1991, 2000):
 - Barycentric Celestial Reference System (BCRS)***
 - ★ voll konsistent mit Allg. Relativitätstheorie
 - ★ berücksichtigt alle relevanten Körper im Sonnensystem
 - ★ räumlicher Nullpunkt: Schwerzentrum (Barycenter) des Sonnensystems
 - ★ Ausrichtung entsprechend ICRS (International Celestial Reference System)
- **Zeiteinheit** = SI-Sekunde
- **Zeitkoordinate** des BCRS ist Barycentric Coordinate Time **TCB**
- Nullpunkt der Zeitrechnung: $TCB - TAI = 32.184 \text{ s}$ am 1.1.1977
- (Komplizierte) Korrekturen notwendig je nach Standort auf der Erde (oder woanders)

2.4 Zeit, Zeitmessung

Motivation: Pulsar Timing:

Pulsare = Neutronensterne = kompakte Sterne
mit \sim Sonnenmasse, ~ 10 km Radius,
starkem **Magnetfeld**, **Rotation** (\sim ms bis \sim s)
-> Radiostrahlung, gebündelten Strahl: "Pulse"

Binärpulsare: starke Gravitation

-> Test der allgemeinen Relativitätstheorie:
Gravitationswellen, Periheldrehung, Gravitationsrotverschiebung

-> Beispiel: **PSR 1913+16** (Hulse & Taylor 1975, Nobelpreis 1993):

Systemparameter (1982):

$$P_p \text{ [s]} = 0.0590299952709(20),$$

$$dP_p/dt \text{ [10}^{-18}] = 8.628(20), \quad d^2P_p/dt^2 \text{ [10}^{-30}/\text{s}] = -58(1200)$$

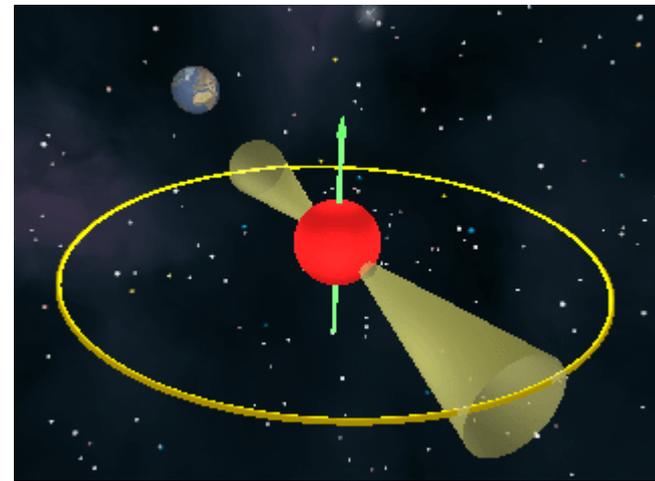
$$P \text{ [s]} = 27906.98161(3), \quad dP/dt \text{ [10}^{-12}] = -2.30(22)$$

$$\omega \text{ [deg]} = 178.8656(15), \quad d\omega/dt \text{ [deg/yr]} = 4.2261(7)$$

$$a \sin i / c \text{ [s]} = 2.34186(24), \quad e = 0.617139(5), \quad M_1 + M_2 \text{ [M}_O] = 2.8278(7), \quad \text{Problem G}$$

-> astron $\sim 1.1 R_O$, apastron $\sim 4.8 R_O$

-> **Bahn schrumpft um 3.1 mm / Bahnperiode** -> verbleibende "Lebenszeit": 300 Mio Jhr



2. Grundlagen der Astronomie und Astrophysik

Zusammenfassung 24.10.2013:

-> Positionen der Himmelskörper, Koordinatensysteme, Entfernungsbestimmung, Zeitmessung

- 1) Himmelskugel, Drehsinn, Erdachse / Himmelsnordpol
- 2) “feste” und mitbewegte” äquatoriale Koordinaten:
Stundenwinkel, Rektaszension, Deklination, Frühlingspunkt
- 3) “Fix-Sterne”, Änderung der Sternpositionen über wenige / viele Jahre:
Präzession, Eigenbewegung, ...
- 4) Erdbahn, Parallaxe, Entfernungsmessung
- 5) Entfernungseinheiten Lichtjahr, Parsec
- 6) Zeiteinheiten: Tage, ..., Jahre, Kalender, Julianisches Datum
- 7) Zeitmessung: Änderung der Erdrotation / Erdbahn, physikalische Zeitdefinition (SI-Einheit), relativistische Effekte

Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

- 17.10. Einführung: Überblick & Geschichte (H.B.)
- 24.10. Sternpositionen, Koordinaten, Zeitmessung (C.F.)
- 31.10. Teleskope und Instrumentierung (H.B.)**
- 07.11. Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)
- 14.11. Planetensystem(e) & Keplergesetze (H.B.)
- 21.11. Sonne & Sterne, Typen / Klassifikation, HR-Diagramm (C.F.)
- 28.11. Interstellare Materie: Chemie & Matriekreislauf (H.B.)
- 05.12. Sternentstehung, Akkretionsscheiben & Jets (H.B.)
- 12.12. Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)
- 19.12. Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)
- - - Weihnachtspause
- 09.01. Mehrfachsysteme & Sternhaufen, Dynamik (C.F.)
- 16.01. Exoplaneten & Astrobiologie (H.B.)
- 23.01. Die Milchstraße (H.B.)
- 30.01. Zusammenfassung (C.F. & H.B.)
- 06.02. Prüfung

Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

Appendix

2.2 Himmelskoordinaten

Horizontales Koordinatensystem

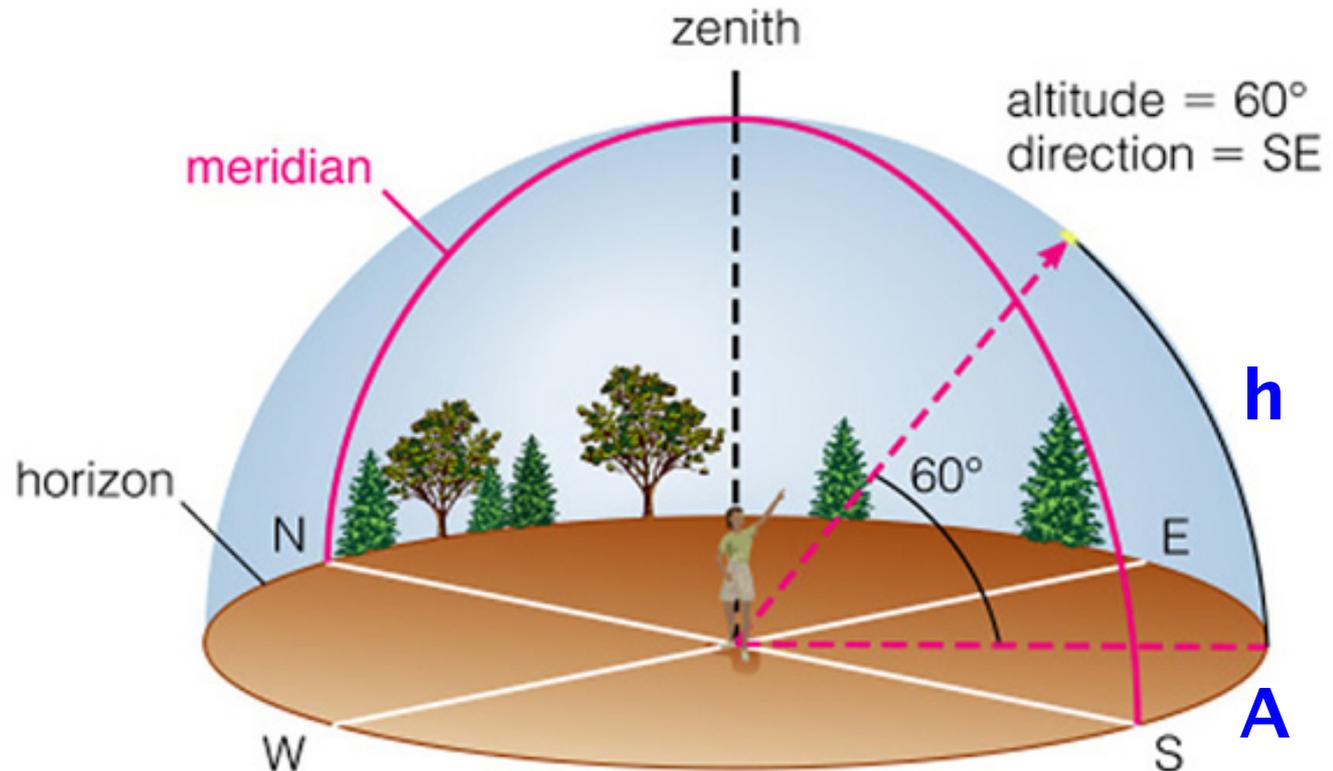
-> “natürliches” System für Beobachtungen

- **Grundkreis (Ebene):** Horizont
- Oberer **Pol:** Zenit, unterer Pol: Nadir
- **Längenkreise:** Großkreise durch Zenit = vertikale = azimutale Kreise
- **Parallelkreis:** Kreise um Achse in verschiedener Höhe h
- **Null-Längengrad:** vertikale Richtung durch Süden = Meridian
- **Koordinaten:**
 - **Azimet** A = Winkel zwischen den Vertikalen durch Objekt und Süden: Zählweise von $S \rightarrow W \rightarrow N \rightarrow O \rightarrow S$ (links-händiges System), manchmal in der Radioastronomie: $S \rightarrow O \rightarrow N \rightarrow W \rightarrow S$
 - **Höhe** h = Winkel über dem Horizont ($-90^\circ \dots +90^\circ$: negativ = unter dem Horizont)

2.2 Himmelskoordinaten

Horizontales Koordinatensystem

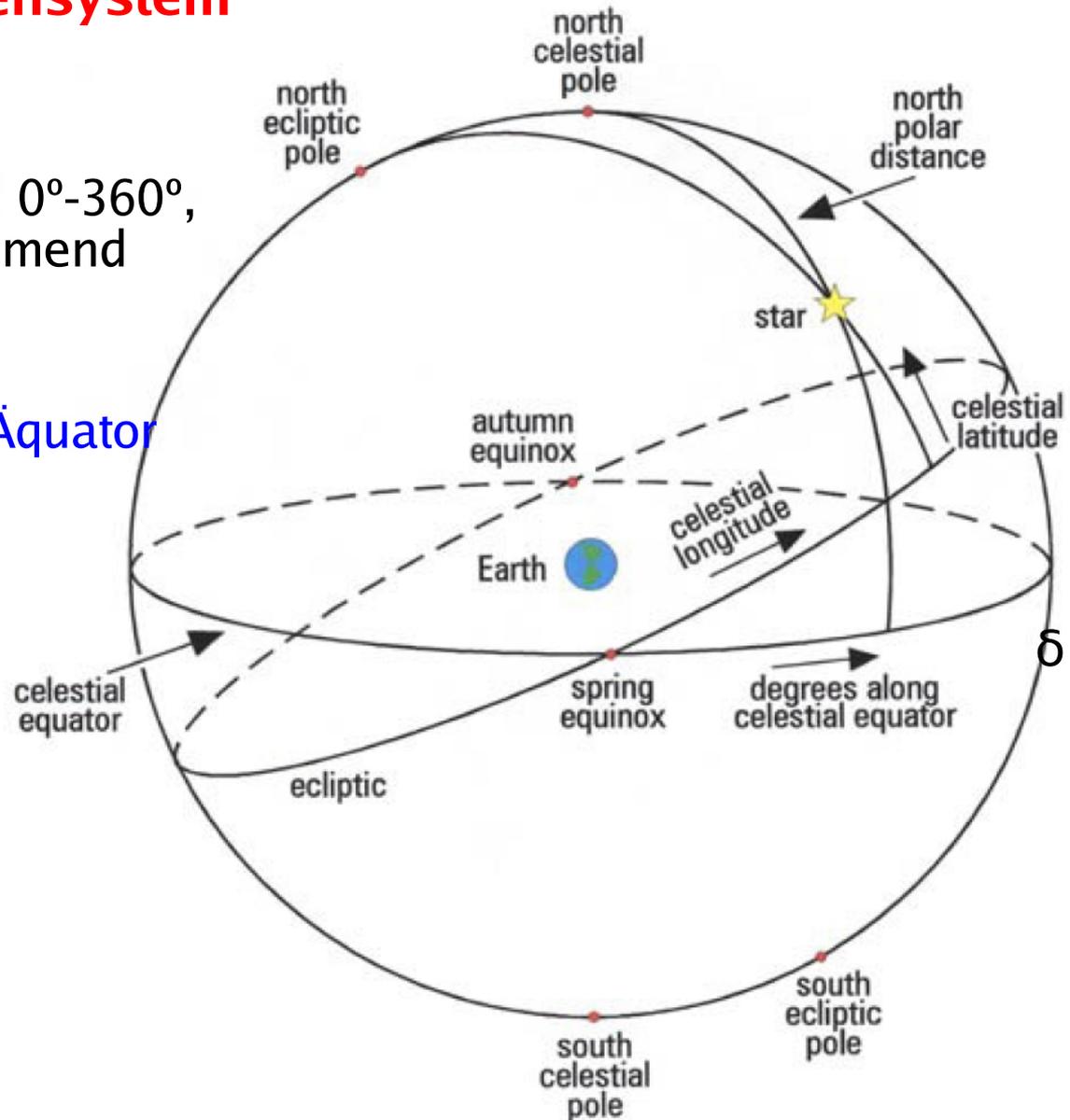
- **Azimut:** A: Winkeldistanz zur Südrichtung
- **Höhe h** (altitude, elevation): Winkeldistanz über dem Horizont
- **Zenit-Distanz:** $z = 90^\circ - h$



2.2 Himmelskoordinaten

Ekliptisches Koordinatensystem

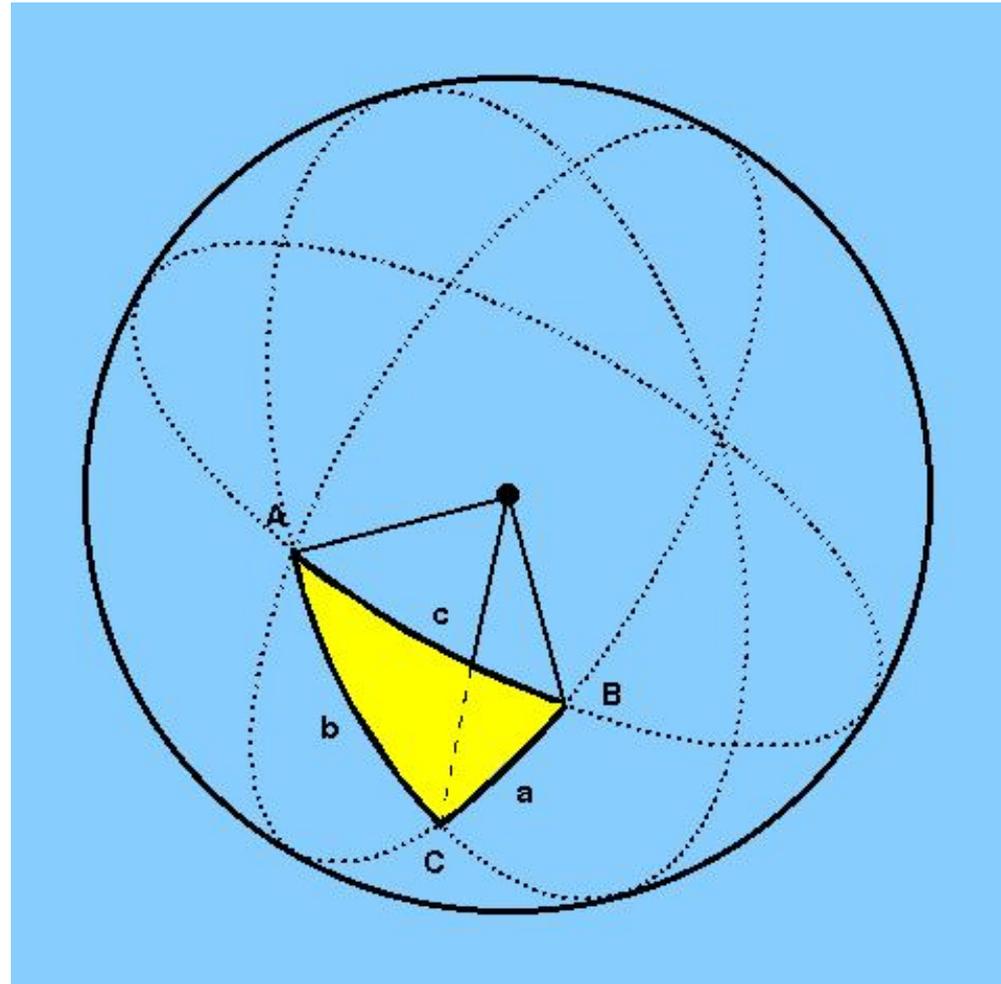
- Koordinaten:
 - Ekliptikale Länge λ : 0° - 360° , nach Osten zunehmend
 - Ekliptikale Breite β : $-90^\circ \dots +90^\circ$
- Ekliptik ist gegenüber Äquator gedreht, Drehung um Frühlingspunkt
- Ekliptikaler Nordpol
 $\alpha = 18\text{h}$
 $= 90^\circ - \varepsilon \approx +66.5^\circ$



2.2 Himmelskoordinaten

Sphärisches Dreieck:

- > **Seitenlängen** a, b, c = Teile von Großkreisen
 - > Längenangabe im Bogenmaß $0 \dots 2\pi = 0 \dots 360^\circ$
- > **Winkel** A, B, C mit $A+B+C > \pi$
- > Grundgleichungen:
 - **Sinus-Regel:**
$$\sin a / \sin A = \sin b / \sin B = \sin c / \sin C$$
 - **Cosinus-Regel (Seiten):**
$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$
 - **Cosinus-Regel (Winkel):**
$$\cos A = -\cos B \cos C + \sin B \sin C \cos a$$
 - **Fläche** $S = A + B + C - \pi$



2.2 Himmelskoordinaten

Koordinatentransformation

$$(t, \delta) \rightarrow (A, z)$$

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

$$\sin A = \cos \delta \sin t / \sin z$$

$$\cos A = (\sin \varphi \cos \delta \cos t - \cos \varphi \sin \delta) / \sin z$$

φ = geographische Breite

Achtung:

z variiert von 0° bis 180° , δ von $+90^\circ$ to -90°

-> eine Gleichung reicht für eindeutige Zuordnung

A und t variieren von 0° bis 360°

-> wegen der Mehrdeutigkeit der trigonometrischen Funktionen müssen ZWEI Gleichungen benutzt werden um den richtigen Quadranten zu bekommen

2.2 Himmelskoordinaten

Koordinatentransformation

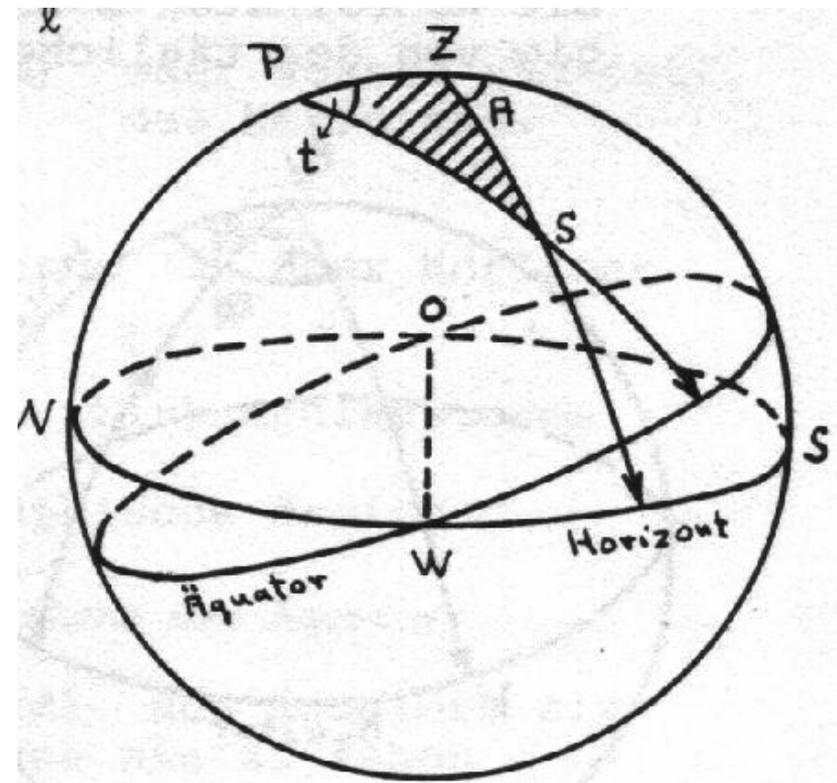
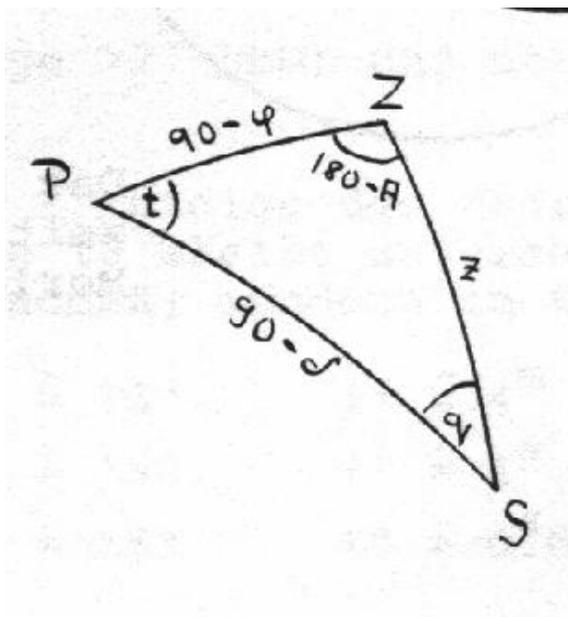
$$(A, z) \rightarrow (t, \delta)$$

$$\cos \delta \sin t = \sin z \sin A$$

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z - \cos \varphi \sin z \cos A$$

$$\cos \delta \cos t = \cos \varphi \cos z + \sin \varphi \sin z \cos A$$

φ = geographische Breite



2.2 Himmelskoordinaten

Sternabstand in sphärischen Koordinaten:

- Positionen (α_1, δ_1) , (α_2, δ_2)
- Umrechnung α_i in Bogenmaß
- Anwendung der Cosinus-Regel:

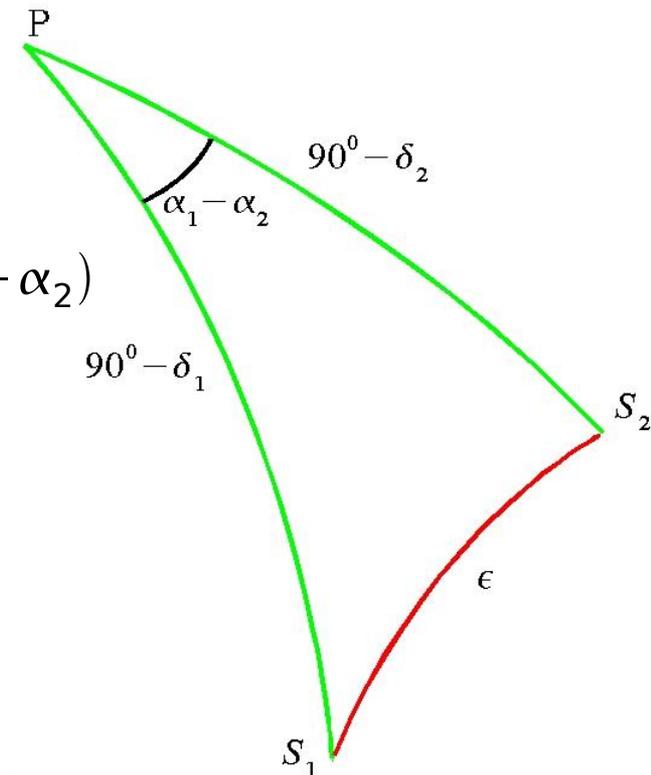
$$\cos \epsilon = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2)$$

- Für kleine Abstände

$$|\delta_1 - \delta_2|, |\alpha_1 - \alpha_2| \ll 90^\circ - \delta_2$$

kann man lokal kartesisch rechnen:

$$\epsilon^2 = (\delta_1 - \delta_2)^2 + (\alpha_1 - \alpha_2)^2 \cos^2 \delta$$



Meßgenauigkeit:

-> **absolut:** 1" (normal opt. Tel.), 0".1 (aktive Optik),

10 mas (milli-arcsec, HIPPARCOS), 20 μ as (Gaia)

-> **relativ:** <1 mas (Astrometrie), ~1 mas (VLBI, Radioastronomie),
für helle Quellen bis 4 μ as

2.4 Zeit, Zeitmessung

- **Sidirischer Monate:**

Mond kehrt zur selben Position relativ zu den Fixsternen zurück
(Latein: *sidus*):

27.321 661 Tage (27 d 7 h 43 min 11.5 s) oder $\sim 27 \frac{1}{3}$ Tage

- **Tropischer Monat:**

Mond kehrt zum Frühlingspunkt zurück:

27.321 582 Tage (27 d 7 h 43 min 4.7 s)

- **Anomalistischer Monat:**

von Erdnähe (Perigäum) zu Erdnähe:

27.554 551 Tage (27 d 13 h 18 min 33.2 s), oder $\sim 27 \frac{1}{2}$ Tage

- **Drakonischer Monat:**

Mond kehrt zum aufsteigenden Knoten (Schnittpunkt Mondbahn/
Ekliptik) zurück:

27.212 220 days (27 d 5 h 5 min 35.8 s), oder $\sim 27 \frac{1}{5}$ Tage

- **Synodischer Monat:**

von Neumond zu Neumond:

29.530 588 Tage (29 d 12 h 44 min 2.8 s), oder $\sim 29 \frac{1}{2}$ Tage

2.4 Zeit, Zeitmessung

Tagundnachtgleichen (Äquinoktia, equinoxes)

- **Frühlingspunkt** (~ 21. März):
 - ★ Sonne überquert Himmels-Äquator von Süden nach Norden (auch **Widder-Punkt**)
 - ★ Sonnen-Position: $\alpha = 0^h$, $\delta = 0^\circ$
- **Herbstpunkt** (~ 21. Sept.):
 - ★ Sonne überquert Himmels-Äquator von Norden nach Süden
 - ★ Sonnen-Position: $\alpha = 12^h$, $\delta = 0^\circ$

Sonnenwenden (Solstices)

- **Sommersonnenwende** (~ 21. Juni):
 - ★ Sonne nimmt ihre nördlichste Position ein
 - ★ Sonnen-Position: $\alpha = 6^h$, $\delta = +23.5^\circ$
- **Wintersonnenwende** (~ 21. Dez.):
 - ★ Sonne nimmt ihre südlichste Position ein
 - ★ Sonnen-Position: $\alpha = 18^h$, $\delta = -23.5^\circ$