2 Sphärische Astronomie

Inhaltsverzeichnis

Zur Untersuchung der Verteilung astronomischer Objekte am Himmel ist es notwendig, geeignete Koordinatensysteme zu definieren, und durch zwei Koordinaten ist die Position eines Objektes am Himmel eindeutig definiert (vgl. Längen- und Breitengrade auf der Erde). Je nach Problemstellung ist es oft günstig, verschiedene Koordinatensysteme zu verwenden. Blickt man zum Himmel, so kann man ungefähr bestimmen, in welcher *Richtung* man das Objekt gesehen hat (S, W, N oder O) und in welcher *Höhe*. Als Merkregel gilt dafür, dass eine ausgestreckte Faust etwa 8 Grad am Himmel misst.

Die sphärische Astronomie sowie die später behandelte Himmelsmechanik, oft auch als klassische Astronomie bezeichnet, erlebten eine Renaissance in der Weltraumfahrt. Exakte Positionsbestimmungen von astronomischen Objekten führten zur Entdeckung von Weißen Zwergen und Schwarzen Löchern (z. B. im Zentrum unserer Milchstraße) und auch zur Entdeckung von extrasolaren Planetensystemen.

Wir wenden uns zunächst astronomischen Koordinatensystemen zu, untersuchen dann den Einfluss der Erdatmosphäre auf die Position der Himmelsobjekte und schließlich Fragen des Kalenders bzw. der Zeit.

A. Hanslmeier, *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, DOI 10.1007/978-3-642-37700-6_2,

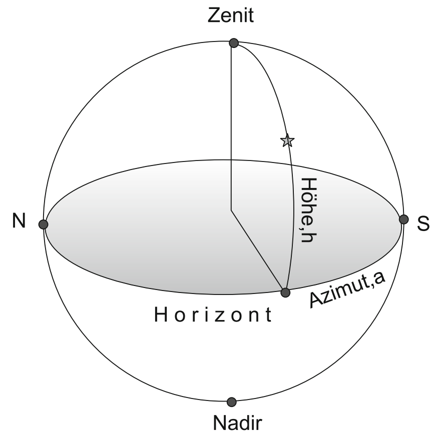


Abb. 2.1 Horizontsystem

2.1 Koordinatensysteme

Von einem Himmelsobjekt kann man i. A. nur dessen Position angeben bzw. dessen Strahlung messen. Zur Angabe der Position denkt man sich die Sterne an eine unendlich ferne Himmelskugel projiziert und legt dann zwei sphärische Koordinaten fest. Die dritte Koordinate wäre dann die Entfernung, die hier aber keine Rolle spielt.

Für jedes System benötigt man

- eine Grundebene, einen Grundkreis, mit dazugehörenden Polen;
- einen Abstand vom Grundkreis, er wird durch Breitenkreise definiert;
- Längenkreise, wobei hier wieder ein Ausgangspunkt zu definieren ist (Null-Längenkreis). Der Abstand eines Objektes von diesem Null-Längenkreis definiert dann die zweite Koordinate.

Analogon: Geographische Breite (bezogen auf den Grundkreis Äquator) und geographische Länge (bezogen auf den Meridian durch Greenwich).

2.1.1 Horizontsystem

Dies ist das System der unmittelbaren Beobachtung: In welcher Himmelsrichtung und in welcher Höhe sieht man ein Himmelsobjekt (Abb. 2.1)?

- Grundkreis: Horizont, oberer Pol = Zenit, unterer Pol = Nadir.
- Längenkreise: Großkreise durch Zenit = Vertikale oder Höhenkreise. Null-Längenkreis: Vertikale durch Südpunkt, der Längenkreis heißt auch *Meridian*.
- Koordinaten:
  - *Höhe h* über Horizont ($0° \ldots 90°$).

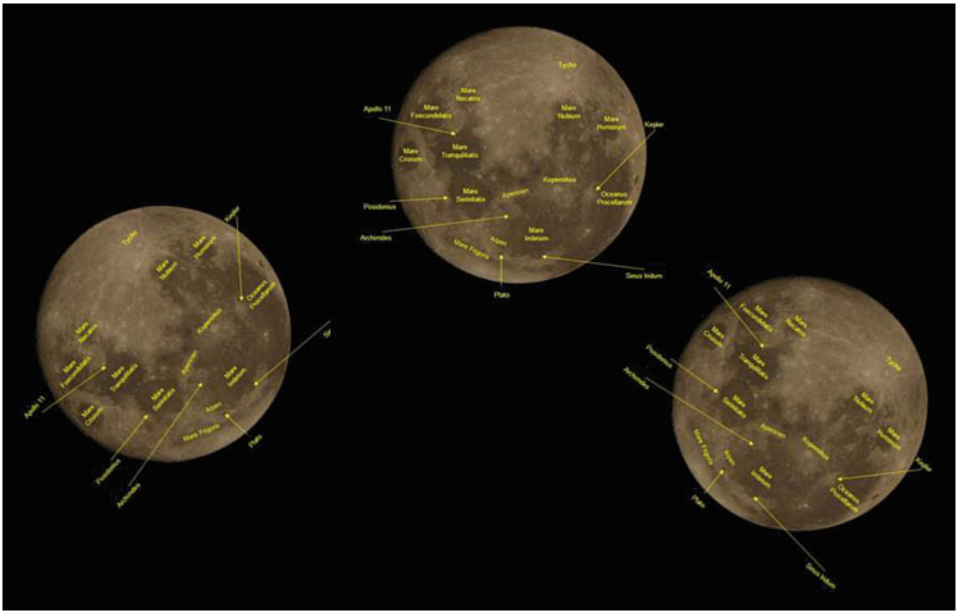


Abb. 2.2 Bildrotation bei einem horizontal montierten Teleskop. *Links* der Mond beim Aufgang, in der *Mitte* beim oberen Meridiandurchgang, *rechts* beim Untergang (© A. Hanslmeier)

– *Azimut a*, Winkel zwischen Vertikal durch das Objekt und Meridian; wird von S über W, N, O gezählt. In der Radioastronomie auch von N-O-S-W.

Sehr große Teleskope und auch Amateurgeräte sind azimutal montiert. Nachteil: Man muss das Teleskop immer in zwei Ebenen nachführen, um der täglichen Bewegung eines Sternes zu folgen. Das Bild eines Objektes scheint im Laufe der Zeit zu rotieren (Abb. 2.2).

2.1.2 Äquatorsystem

Hier unterteilt man in festes Äquatorsystem und bewegliches Äquatorsystem.

Festes Äquatorsystem

dient zur Beobachtung am Teleskop (Abb. 2.3).

- Grundkreis: Himmelsäquator = Projektion des Erdäquators an die Himmelssphäre. Nord- und Südpol am Himmel ergeben sich als Verlängerung der Erdachse. Zufällig befindet sich gegenwärtig in der Nähe des Nordpols ein relativ heller Stern, der Polarstern. Auf der Südhalbkugel gibt es keinen Polarstern.
- Null-Längenkreis: Meridian, geht durch Pol, Zenit und Südpunkt.

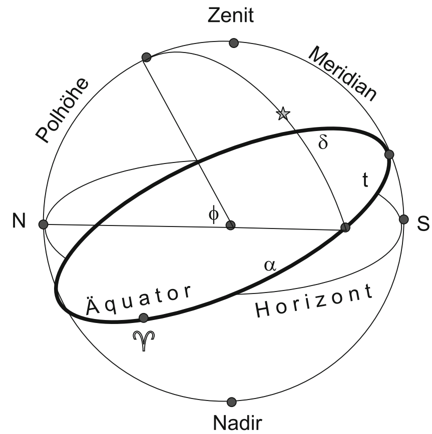


Abb. 2.3 Äquatorsystem. t ist der Stundenwinkel, S der Südpunkt, α die Rektaszension, δ die Deklination, ♈ der Frühlingspunkt

- Koordinaten: *Deklination* δ: Abstand vom Äquator (±90°);
  Stundenwinkel t: Abstand des Längenkreises durch das Himmelsobjekt vom Meridian. Man zählt wieder von S-W-N-O.

Sterne, die sich nördlich des Himmelsäquators befinden, sind auf der Nordhemisphäre der Erde mehr als 12^h über dem Horizont (vgl. Sonne im Sommerhalbjahr). Die Höhe des Himmelspols wird durch die geographische Breite Φ gegeben. Befindet sich der Beobachter am Erdäquator, dann ist der Pol am Horizont (also $\Phi = 0°$). Befindet sich ein Beobachter am Nordpol der Erde, dann steht der Polarstern und damit der Himmelsnordpol genau senkrecht im Zenit, also ist $\Phi = 90°$. Zirkumpolarsterne gehen für einen Ort der geographischen Breite Φ niemals unter.

Für die Nordhalbkugel der Erde gilt:

- $\delta = 0$, Objekt 12^h über Horizont.
- $\delta > 0$, Objekt mehr als 12^h über Horizont.
- $\delta < 0$, Objekt weniger als 12^h über Horizont.
- $\delta > 90° - \Phi$, Zirkumpolarsterne.
- Am Pol der Erde sind alle Sterne nördlich des Äquators zirkumpolar.

Nachteil dieses Koordinatensystems: Der Stundenwinkel durchläuft wegen der Rotation der Erde im Laufe eines Tages alle Werte.

Zur Umrechnung von Zeitangaben in Graden verwendet man:
$24^h = 360°$, entsprechend $1^h = 15°$ usw.
Die Kulminationshöhe eines Sterns beträgt $h_{\max} = 90 - \Phi + \delta$.
Der Stundenwinkel t ist also die seit dem Meridiandurchgang eines Sterns vergangene Zeit.
$t = 0^h$ Stern in oberer Kulmination;
$t = 12^h$ Stern in unterer Kulmination.

Bei der äquatorialen oder parallaktischen Montierung eines Teleskops steht die Stundenachse parallel zur Erdachse, und man braucht daher nur mehr in einer Ebene nachzuführen.

Bewegliches Äquatorsystem

Da sich der Stundenwinkel laufend ändert, definiert man das bewegliche Koordinatensystem.

- Grundkreis: Himmelsäquator.

$$\begin{array}{llllll} 1^{h} & \sim & 15^{\circ} & 1^{\circ} & \sim & 4^{m} \\ 1^{m} & \sim & 15' & 1' & \sim & 4^{s} \\ 1^{s} & \sim & 15'' & 1'' & \sim & 0{,}07^{s} \end{array}$$

- Null-Längenkreis: Stundenkreis durch den Frühlingspunkt. Dieser ist definiert als einer der Schnittpunkte zwischen Sonnenbahn (Ekliptik) und Äquator, und zwar der Ort der Sonne zu Frühlingsbeginn.
- Koordinaten: δ *Deklination*, α *Rektaszension* = Abstand der Stundenkreise durch das Himmelsobjekt und Frühlingspunkt. Wichtig: α wird entsprechend der Bewegung der Sonne nach Osten gezählt.

Vorteil: Beide Koordinaten sind nun fest und zur Katalogisierung der Objekte geeignet. Man führt noch die Sternzeit Θ ein: Stundenwinkel des Frühlingspunktes. Es gilt:

$$t = \Theta - \alpha \tag{2.1}$$

▸ Am häufigsten in der Astronomie verwendet man die Koordinaten Rektaszension α und Deklination δ. Die Sternzeit Θ ist der Stundenwinkel des Frühlingspunktes.

2.1.3 Ekliptiksystem

Hier ist der Grundkreis die Ekliptik (Abb. 2.4), also die scheinbare Bahn der Sonne am Himmel (die durch die Bewegung der Erde um die Sonne entsteht), und man definiert als Koordinaten die ekliptikale Länge λ (vom Frühlingspunkt aus gezählt) sowie die ekliptikale Breite β. Die Ekliptik ist um 23,5° gegenüber dem Äquator geneigt. Die Deklination der Sonne zu Sommerbeginn beträgt daher 23,5 Grad. So kann man die Neigung der Ekliptik bestimmen. In Tab. 2.1 sind die Koordinaten der Sonne zu Beginn der Jahreszeiten gegeben.

Tab. 2.1 Koordinaten der Sonne im Äquatorsystem bzw. Position der Sonne im Tierkreiszeichen. Äquinoktium bedeutet Tag-und-Nachtgleiche, Solstitium Sonnenwende

Datum	Dekl.	RA	Sonne in
21. März, Frühlingsbeg., Äquinoktium	$0°$	0^h	Widder
22. Juni, Sommerbeg., Solstitium	$+23{,}5°$	6^h	Krebs
23. September, Herbstbeg., Äquinoktium	$0°$	12^h	Waage
22. Dezember, Winterbeg., Solstitium	$-23{,}5°$	18^h	Steinbock

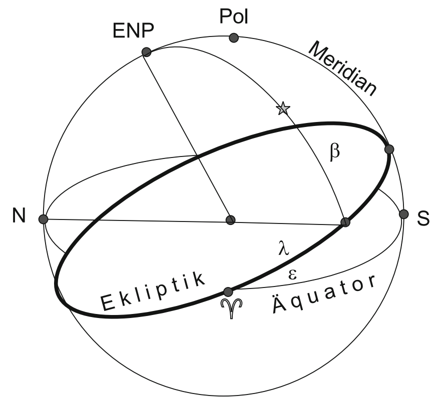


Abb. 2.4 Ekliptiksystem; ENP ist der ekliptische Nordpol, Pol bezeichnet den Himmelsnordpol. λ ist die ekliptikale Länge, β die ekliptikale Breite. Die Bewegung der Sonne erfolgt per Definition in der Ekliptikebene. Mond und Planeten bewegen sich nahe der Ekliptik

2.1.4 Galaktisches System

Der Grundkreis ist durch die Milchstraßenebene definiert, und der Null-Längenkreis geht durch das galaktische Zentrum. Dies führt auf die Koordinaten b, galaktische Breite, und l, galaktische Länge. Galaktische Koordinaten verwendet man zur Untersuchung der Verteilung von Sternen und Sternhaufen in unserer Milchstraße (Galaxis).

2.1.5 Transformationen der Systeme

Oft stellt sich die Frage: Man hat zur Zeit T in der Höhe h unter dem Azimutwinkel a ein Objekt gesehen. Wie kann man daraus die Koordinaten erhalten, die zu einer Katalogisierung des Objektes führen?

Um die Transformationsformeln herzuleiten, benötigt man sphärische Dreiecke, die auf einer Kugeloberfläche definiert sind (Abb. 2.5). In einem derartigen Dreieck gelten der Sinus- und der Cosinussatz:

$$\boxed{\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin b}{\sin \beta} = \frac{\sin c}{\sin \gamma}} \tag{2.2}$$

$$\boxed{\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha} \tag{2.3}$$

Abb. 2.5 Sphärisches Dreieck, auf einer Kugeloberfläche definiert

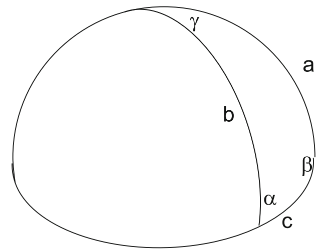
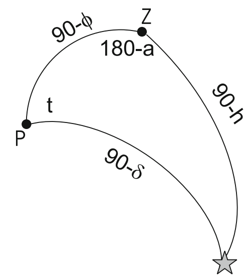


Abb. 2.6 Astronomisches sphärisches Dreieck



$$\boxed{\cos b = \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos \beta} \tag{2.4}$$

$$\boxed{\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \gamma} \tag{2.5}$$

Das sogenannte astronomische Dreieck (Abb. 2.6) entsteht durch Überlagerung des Horizontsystems mit dem Äquatorsystem; dessen Enden sind bestimmt durch Pol P, Zenit Z und Objekt; die Seiten lauten $90° - \delta$, $90° - \Phi$, $z = 90° - h$. Weiterhin kennt man zwei Winkel t und $180° - a$ (Abb. 2.6).

Mit den Formeln der sphärischen Trigonometrie findet man:

$$\boxed{\sin z \sin a = \cos \delta \sin t} \tag{2.6}$$

$$\boxed{\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos t} \tag{2.7}$$

$$\boxed{-\sin z \cos a = \cos \Phi \sin \delta - \sin \Phi \cos \delta \cos t} \tag{2.8}$$

bzw.:

$$\boxed{\cos \delta \sin t = \sin z \sin a} \tag{2.9}$$

$$\boxed{\sin \delta = \sin \Phi \cos z - \cos \Phi \sin z \cos a} \tag{2.10}$$

$$\boxed{\cos \delta \cos t = \cos \Phi \cos z + \sin \Phi \sin z \cos a} \tag{2.11}$$

2.2 Die Zeit

2.2.1 Definitionen, Sonnenzeit und Sternzeit

Es gibt verschiedene Zeitbegriffe:

- Sternzeit: Stundenwinkel des Frühlingspunktes.
- Sterntag: Zeit zwischen zwei Meridiandurchgängen des Frühlingspunktes. Die Sternzeit ist für alltägliche Zwecke nicht geeignet, da sich die Sonne bewegt und $\Theta = 0^h$ zu verschiedenen Tageszeiten eintritt.
- Wahre Sonnenzeit: Stundenwinkel der wahren Sonne $+12^h$ (somit Tagesanfang nachts). Diese ist jedoch ein ungleichmäßiges Zeitmaß, da sich die Geschwindigkeit der Sonne ändert (im Winter durchläuft die Erde den sonnennächsten Punkt ihrer Bahn und bewegt sich daher schneller) und die Sonne in der Ekliptik und nicht am Äquator läuft.
- Mittlere Sonnenzeit: Man definiert eine fiktive Sonne, die gleichmäßig am Äquator läuft. Die Zeitgleichung ist der Unterschied zwischen wahrer und mittlerer Zeit. In der Zeitgleichung gibt es zwei Perioden:
  - ganzjährige Periode: entsteht durch die wechselnde Geschwindigkeit der Erde (auf der Nordhalbkugel dauert das Sommerhalbjahr 186 Tage, das Winterhalbjahr nur 179 Tage);
  - halbjährige Periode wegen des Projektionseffekts auf den Äquator.

  Die Maxima in der Zeitgleichung sind am 14.5. (+3,7 min) bzw. 4.11. (+16,4 min). Die Minima sind am 12.2. (−14,3 min) und am 26.7. (−6,4 min).

  Bedingt durch den Umlauf der Erde um die Sonne in einem Jahr bewegt sich diese scheinbar in einem Jahr um den gesamten Himmel (360°), daher also pro Tag rund 1° nach Osten weiter, was etwa vier Zeitminuten entspricht.

  Bei der Rotation der Erde unterscheidet man (siehe Abb. 2.7) zwischen

- synodischer Rotation der Erde, nach einer synodischen Rotation ist die Sonne wieder an derselben Stelle am Himmel, und

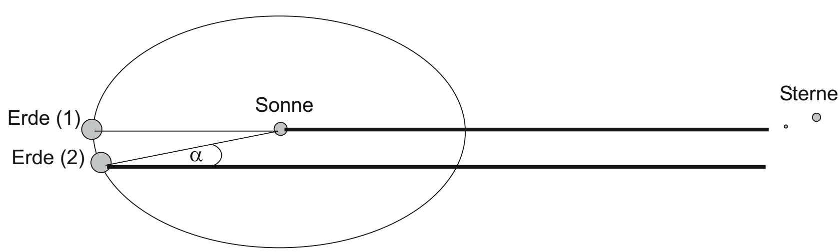


Abb. 2.7 Unterschied zwischen synodischer und siderischer Rotation. Nach einer siderischen Rotation befindet sich ein Stern wieder im Meridian, die Sonne jedoch ist um den Winkelbetrag α entfernt

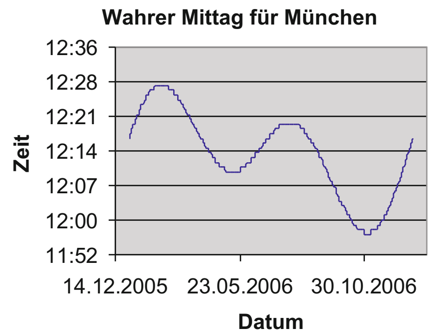


Abb. 2.8 Wahrer Mittag für München berechnet

Tab. 2.2 Berechnung der Sternzeit

$+14^h 00^{min}$	Zeit in UT
$+\sim 2^{min}$	Korrektur der 14 Stunden auf Sternzeit
$4^h 00^{min}$	Sternzeit um 0^h UT ← Jahrbuch
$+1^h 01^{min} 47^s$	Umrechnung geograph. Länge in Zeit
$19^h 04^{min}$	**lokale Sternzeit in Graz**

- siderischer Rotation der Erde, nach einer siderischen Rotation ist ein Stern wieder an derselben Position am Himmel.

Pro Tag ergibt sich so ein Unterschied von vier Minuten (in Abb. 2.7 durch den Winkel α angedeutet), was in einem Monat zwei Stunden ausmacht. Geht also ein Stern am Monatsanfang um 22 Uhr auf, so erfolgt sein Aufgang am Monatsende bereits um 20 Uhr. Da sich die Erde um die Sonne bewegt, ist nach einer siderischen Rotation (von Position 1 nach Position 2 in Abb. 2.7) die Sonne um $\sim 360°/365 \sim 1° \sim 4^m$ zurückgeblieben und noch nicht im Meridian. Damit ist der Sonnentag länger als der Sterntag.

24^h Sonnenzeit entspricht $24^h 3^m 56{,}55^s$ Sternzeit.

24^h Sternzeit entspricht $23^h 56^m 4{,}09^s$ mittlerer Sonnenzeit.

Für jede geographische Länge gilt eine eigene Sonnenzeit, und daher ist die Einführung von Zeitzonen zweckmäßig: In Streifen von etwa 15° Länge soll die bürgerliche Zeit gleich sein.

In Mitteleuropa ist die mittlere Sonnenzeit = Zonenzeit für Orte auf 15° Länge. Für $l < 15°$ steht die Sonne später im Meridian, für $l > 15°$ früher.

Beispiele:

- $l = 0°$ Greenwich = WEZ (westeuropäische Zeit).
- $l = 15°$ = MEZ (mitteleuropäische Zeit).
- $l = 30°$ = OEZ (osteuropäische Zeit).

In Tab. 2.2 ist angegeben, wie man die Sternzeit für Graz (Länge entspricht $+1^h 01^{min} 47^s$) für 15 Uhr MEZ berechnet (= 14 Uhr UT, Weltzeit). In Abb. 2.8 ist der wahre Mittag für München gegeben.

Für einen Ort der Länge $l = 10°$ erfolgt der Meridiandurchgang der mittleren Sonne um 20^m (da $1° \sim 4^m$) nach dem wahren Mittag. Dazu kommt noch die Zeitgleichung. Diese beträgt z. B. am 12. Februar 14^m, also ist dort der Meridiandurchgang erst um 12^h34^m, daher relativ langer Nachmittag.

Datumsgrenze: bei $l = 180°$: Reist man nach Osten, hat man einen Tag doppelt, bei der Reise nach Westen wird ein Tag übergangen.

Die *Weltzeit* (Universal Time, UT) ist die Greenwicher Zeit. Sie wird meist bei astronomischen Ereignissen angegeben.

Wir behandeln nun die Zeiteinheit Jahr. Grob gesagt ist ein Jahr ein Erdumlauf um die Sonne.

- Tropisches Jahr: Umlauf von Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt
  $365^d5^h48^m46^s = 365{,}24220^d$ mittlere Sonnenzeit.
  Das tropische Jahr bestimmt die Jahreszeiten, daher sollte ein Kalender ihm angepasst sein. Den Beginn des tropischen Jahres rechnet man, wenn für die mittlere Sonne $\alpha = 280°$ beträgt (annus fictus).
- Siderisches Jahr: Die Zeit, nach der zu einer bestimmten Uhrzeit ein Stern wieder an derselben Position am Himmel steht. Dieses ist um 20^m länger als das tropische Jahr $365^d6^h9^m10^s = 365{,}25636^d$.
- Anomalistisches Jahr: Umlauf von Perihel (sonnennächster Punkt der Erdbahn) zu Perihel. Die Erdbahnellipse ist nicht raumfest infolge der Störungen durch die anderen Planeten, $365^d6^h13^m53^s = 365{,}25946^d$.

2.2.2 Kalender

Mit dem Sesshaftwerden der Menschen, die Ackerbau betrieben, wurde eine Einteilung der Zeit = Kalender wichtig. Die Einheiten aller Kalender sind im wesentlichen Tag, Monat und Jahr. Im Prinzip sollte ein Kalender dem tropischen Jahr angepasst sein, da dieses die Jahreszeiten bestimmt.

Im alten *Ägypten* wurde zunächst ein reiner Sonnenkalender mit einem Jahr von 365 Tagen verwendet. Das Jahr hatte 12 Monate zu 30 Tagen, und dann gab es noch fünf Zusatztage. Nun ist aber das tatsächliche Sonnenjahr um ca. 1/4 Tag länger, und daher durchläuft der Jahresbeginn nach 1461 Jahren einmal den gesamten ägyptischen Kalender. Der Zeitpunkt der Nilüberschwemmungen fiel zunächst mit dem heliakischen Aufgang des Sirius (Sothis) zusammen[1]. Alle vier Jahre verschob sich das Ganze um einen Tag. 238 v. Chr. wurde von Ptolemäus III. im Dekret von Canopus der Kalender reformiert: Das Jahr hat 365 Tage, und alle vier Jahre gibt es einen zusätzlichen Tag, also 366 Tage. Im Jahre 48 v. Chr. landete dann J. *Cäsar* mit seinen Truppen in Alexandrien, und bereits im Jahre 46 v. Chr.

[1] Darunter versteht man den Zeitpunkt, zu dem Sirius nach seiner Konjunktion mit der Sonne zum ersten Mal wieder am Morgenhimmel gesehen werden kann.

http://www.springer.com/978-3-642-37699-3

Einführung in Astronomie und Astrophysik
Hanslmeier, A.
2014, XIX, 624 S. 284 Abb., 179 Abb. in Farbe.,
Softcover
ISBN: 978-3-642-37699-3