

Astronomische Zeitbestimmung

Bei der Betrachtung der astronomischen Zeitbestimmung muss man unterscheiden zwischen der **Festlegung eines Zeitpunktes** und **eines Zeitintervalles**. Betrachten wir zunächst die Festlegung einer Zeitdauer. Um ein Zeitintervall festzulegen, benötigt man einen mit einer **konstanten Periode** ablaufenden Vorgang. Die **Erdrotation** und der **jährliche Umlauf der Erde um die Sonne** ergeben die Perioden **ein Tag** bzw. **ein Jahr**. Kürzere Perioden und damit kürzere Zeitintervalle haben die alten Ägypter schon mit **Wasseruhren** oder **Sanduhren** messbar gemacht. Sie wurden von **mechanischen Uhren** abgelöst, die dann auch für die **Längenbestimmung** bei der **Navigation in der Seefahrt** eine entscheidende Rolle gespielt haben. Mit der Entwicklung der **Quarzuhren** ergab sich ein weiterer technischer Fortschritt bei der allgemein verfügbaren Genauigkeit in Bezug auf kurze Zeiteinheiten, speziell auf die **Zeiteinheit Sekunde**.

Für die Ansprüche der Physik sind die entsprechenden Definitionen aber nicht genau genug. Daher hat die Physik eine **eigene Definition und Messvorschrift** für die Sekunde als Zeiteinheit entwickelt. Diese Zeiteinheit muss aber in irgendeiner Form mit der **astronomisch** definierten **Zeiteinheit Sekunde** in Verbindung gebracht werden.

Im *Systeme International* der Maßeinheiten ist seit **1967** die **SI-Sekunde** als die Zeitdauer **definiert**, die **9.192.631.770 Schwingungen** des Übergangs zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von **Cäsium-133** benötigen. Sie ist also das Vielfache der Periode einer Mikrowelle, die mit dem ausgewählten **Niveauübergang** des Cäsium-133-Atoms in **Resonanz** steht. Sie ist die Basis des **1958** eingeführten Zeitdienstes **Temps Atomique International (TAI)**. In Deutschland sorgt die PTB für den Erhalt dieser **Zeiteinheit**. Die Dauer der SI-Sekunde wurde so gewählt, dass sie bestmöglichst mit der bis dahin gebräuchlichen **Ephemeridensekunde** übereinstimmt. Aber wie ist denn eine Ephemeridensekunde definiert?

Formal wurde die **Ephemeridenzeit ET** durch die **Newcombsche Theorie der scheinbaren Bewegung der Sonne** definiert. Die zugehörige **Referenzebene** ist daher die **Ekliptik**. Für die Länge dieser Zeiteinheit einigten sich die **IAU** und das **Internationale Komitee für Maße und Gewichte** auf die Definition

Die **ET-Sekunde** ist der **Bruchteil $1/31.556.925,9747$ des tropischen Jahres** am 0. Januar 12 Uhr 1900, i. e. am 31. Dezember 1899 12 h 0 m 0 s ET.

Was ist das tropische Jahr? Es ist die Zeit, die die Erde in ihrer Bahn um die Sonne benötigt, um vom mittleren Frühlingspunkt um 360° voranzuschreiten.

Mit dieser Definition wird ein **Zeitpunkt** $ET = 0 \text{ h } 0 \text{ m } 0 \text{ s}$ und ein **Zeitintervall** (tropisches Jahr) festgelegt. Das Zeitintervall bezieht sich auf die **scheinbare jährliche Bewegung der Sonne** in der Ekliptik. Der Zeitpunkt $ET = 0 \text{ s}$ wurde von der IAU **1958** auf ihrer 10. Generalversammlung folgendermaßen festgelegt:

Der Zeitpunkt $ET = 0 \text{ s}$ ist der Zeitpunkt, an dem am 0. Januar 1900, 12 h 0 m 0 s, (i.e. am 31. Dezember 1899, 12 h 0 m 0 s UT) die mittlere geometrische Länge der Sonne in der Ekliptik $279^\circ, 41' \text{ und } 48.04''$ betrug.

Was ist die mittlere ekliptikale Länge der Sonne? Sie ist durch eine sog. **Dynamical Mean Sun (DMS)** definiert, die sich ergibt, wenn sich die Erde auf einer Kreisbahn, also

gleichförmig, um die Sonne bewegen würde, wobei **im Perihel und im Aphel** die Positionen der wahren Sonne und der dynamischen Sonne übereinstimmen. Die **Exzentrizität der Erdbahn** erzeugt daher eine **halbjährige Variation** in der Differenz zwischen wahrer und mittlerer ekliptikaler Länge der Sonne.

Die mittlere Länge der Sonne h berechnet sich nach der von Newcomb hergeleiteten Beziehung

$$h = 279^{\circ},696678 + 36000^{\circ},768925 T + 0^{\circ},0003025 T^2,$$

wobei T als Bruchteil der Anzahl von Tagen in Julianischen Jahrhunderten zu 36.525 Tagen, die seit dem **31. Dezember 1899 12 h UT** (Julianisches Datum $JD_0 = 2.415.020,0$) verstrichen sind, angegeben wird:

$T = (JD - JD_0)/36525$, $JD_0 = 2.415.020,0$ für den 31. Dezember 1899 12h UT , i. e. 0. Januar 1900, 12 h ET, auch mit Epoche 1900.0 bezeichnet.

Dieser Zeitpunkt entspricht dem ET-Zeitpunkt 0 h 0 m 0 s ET. Beim **Julianischen Datum JD** handelt es sich um eine **reine Tageszählung**. Bei Daten vor 1900.0 ist zu beachten, nach welchem Kalender diese Daten angegeben sind. Das Julianische Datum wurde 1583 von dem französischen Historiker **Scaliger** eingeführt. Es reicht bis ins Jahr 4713 v. Chr. zurück.

Die grundlegende Einheit der ET ist das **tropische Jahr 1900.0**. Die ET-Sekunde ergibt sich als entsprechender Bruchteil dieses Jahres. Das tropische Jahr ist definiert als die Zeit, in der sich die mittlere Länge der Sonne um 360° (von Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt) ändert. Da ein Tag 86400 ET Sekunden umfasst, entspricht 1 ETs einem $T^* = 1/(36525 \times 86400)$. In dieser Zeit bewegt sich die **dynamische Sonne** um den Winkel $\psi = 36000^{\circ},768925 T^*$ in ihrer Kreisbahn. Das Verhältnis $N = 360^{\circ}/\psi = 31.556.925,9747$ definiert die ET-Sekunde als Bruchteil $1/N$ der Länge des tropischen Jahres 1900.0.

Der nichtlineare Anteil mit T^2 stellt eine nichtperiodische, säkulare Beschleunigung der mittleren Länge der Sonne dar, die durch die solar bedingte Präzessionsbewegung des Frühlingspunktes entsteht, die der Bahnbewegung der Erde entgegengerichtet ist.

Das Konzept der **mittleren Länge der Sonne** wurde **1895** von Newcomb eingeführt, um die Zeitpunkte in seinen Tabellen der scheinbaren Sonnenposition zu charakterisieren. Damals konnte man die Unregelmäßigkeit der Erdrotation noch nicht messen, und ein Unterschied zwischen dem Verlauf von ET und UT war noch nicht feststellbar. Die ET sollte eine gleichmäßig ablaufende Zeit definieren, die in Übereinstimmung mit der Zeit in der Newtonschen Mechanik steht. Dieser Zeitbegriff muss aber nach der Relativitätstheorie korrigiert werden.

Nach der **Allgemeinen Relativitätstheorie** hängt die gemessene Zeit vom Ort auf der Erde ab (genauer von der Höhe) und von der Geschwindigkeit der Uhr. Die physikalisch definierte Zeit TAI bezieht sich deshalb auf einen Messort auf Meereshöhe, der sich mit der Erde mitdreht (Eigenzeit der Erde).

1977 wurde durch die Generalversammlung der **IAU** in Grenoble, Frankreich die Zeitskala für einen Bezugsort auf der Erde als **TDT (Terrestrial Dynamical Time)** definiert durch die Festlegungen, dass die **Zeiteinheit der TDT die SI-Sekunde** sei und der Zeitpunkt 1. Januar 1977, 0 Uhr TAI dem Zeitpunkt 1. Januar 1977, 0 Uhr 0 Minuten und 32,184 Sekunden TDT entspricht . Die Differenz von 32,184 Sekunden entsprach dem damaligen **Unterschied**

zwischen TAI und ET ($ET = TAI + 32,184 \text{ s}$) und wurde im Interesse einer Kontinuität zwischen (alter) ET und (neuer) TDT gewählt. Trotz des Bezugs auf die gemeinsame Grundlage der SI-Sekunde sind TAI und TDT im Grunde keine identischen Zeitskalen. TAI als gewichteter Mittelwert von Messungen von vielen Atomuhren könnte mögliche systematische Fehler bei der Realisierung der Atomzeit enthalten, während TDT eine dynamisch definierte, gleichförmig verlaufende Zeit darstellt.

Um in Deutschland einen **Zeitpunkt** festzulegen, bezieht man sich am besten auf das DCF77-Signal der PTB in Braunschweig, das kontinuierlich ausgesendet wird. Es beruht auf der **Koordinierten Weltzeit UTC**, die wiederum mit der **Internationalen Atomzeit TAI** verknüpft ist, die auf der Basis von etwa 250 Atomuhren an etwa 50 weltweit verteilten Stationen ermittelt wird. Die TAI wurde so festgelegt, dass der 1. Januar 1958, 0 h 0 m 0 s TAI mit dem entsprechenden Zeitpunkt der mittleren Sonnenzeit am Nullmeridian, d. h. am Greenwich-Meridian, UT1 bzw. Greenwich Mean Time (GMT) genannt, übereinstimmt. UT1 diene als Grundlage der Weltzeitbestimmung, solange diese auf astronomischen Beobachtungen beruhte.

Im täglichen Leben merkt der Mensch am Stand der Sonne am Himmel, dass die Zeit vergeht: morgens geht die Sonne auf, erreicht am Mittag ihren Höchststand am Himmel im Süden, d. h. im Meridian, und am Abend geht sie unter. Die Tageslänge, also die Zeit zwischen Sonnenaufgang und Untergang, ändert sich aber von Tag zu Tag, ebenso die Bahn der Sonne am Himmel und die Zeiten des Auf- und Untergangs. Sonnenaufgang und Sonnenuntergang sind markante tägliche Ereignisse, deren Zeitpunkte sich aber im Laufe eines Jahres gegenüber einer gleichmäßig ablaufenden Zeit in unseren Breiten um Stunden verschieben. Sie sind also ungeeignet für eine zeitliche Festlegung. Demgegenüber weist der **Höchststand der Sonne** am Himmel eine sehr viel geringere zeitliche Variation im Lauf eines Jahres auf. Es war daher sinnvoll, den **Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes**, also **Mittag**, als **Bezugszeitpunkt** festzulegen und den Tag von Mittag zu Mittag in 24 Stunden einzuteilen. Wie die Unterteilung der mittleren Tageslänge in 24 Stunden mit 60 Minuten mit 60 Sekunden zustande gekommen ist, habe ich nicht feststellen können. Wahrscheinlich geht sie auf die Babylonischen Astronomen zurück, die den Kreis in 360° , $60'$ und $60''$ unterteilt haben.

Wegen der Drehung der Erde um ihre Achse ist der Kreis, an dem wir die Stunden zählen, der **Himmelsäquator**, der durch Projektion des Erdäquators an den Himmel entsteht. Wenn der Kreis 360° umfasst und die Sonne 24 h von Höchststand zu Höchststand benötigt, dann legt die mittlere Sonne offensichtlich $15^\circ/\text{h}$ auf dem Stundenkreis am Himmel in westlicher Richtung zurück. Aber das ist ja nicht die echte Sonne in ihrer Bahn!

Die Geschwindigkeit $15^\circ/\text{h}$ ist also nicht die Geschwindigkeit der wahren Sonne in ihrer Bahn, sondern die Geschwindigkeit eines fiktiven Punktes in der Äquatorebene, der gleichförmig mit $15^\circ/\text{h}$ in der Äquatorebene von E nach W umläuft. Dieser fiktive Punkt wird **Universal Mean Sun (UMS)** (mit den sich ständig ändernden Koordinaten Rektaszension α und Deklination δ im festen, an den Fixsternen orientierten Äquatorsystem) genannt.

Der Zeitablauf, den uns die Sonne zur Verfügung stellt, hängt also von zwei völlig unabhängigen „periodischen“ Vorgängen ab, nämlich von der **Drehung der Erde** um ihre Rotationsachse **und** von der **jährlichen Bewegung der Erde** um die Sonne. Die Astronomen haben natürlich diese beiden Einflüsse voneinander getrennt und daher zwei unterschiedliche Zeitsysteme entwickelt: Die **Weltzeit (UT)**, die nur mit der Eigendrehung der Erde in Beziehung steht und unser tägliches Leben bestimmt, und die **Ephemeridenzeit (ET)**, seit

1984 auch **terrestrische dynamische Zeit (TDT)** genannt, die sich nur auf die Bahnbewegung der Erde (genauer: des gemeinsamen Schwerpunktes von Erde und Mond) um die Sonne bezieht und die für alle Ereignisse wichtig ist, die für die Astronomen von Bedeutung sind wie Planetenbewegungen, Sonnenfinsternisse, Mondfinsternisse, Kometen- und Meteoriteneignisse, in früherer Zeit aber auch die Vorhersage jahreszeitlich bedingter Ereignisse wie Überschwemmungen oder Heuschreckenplagen.

Lokal wird die **Sonnenzeit** nach dem Stand der Sonne am Himmel gemessen: Es ist **lokal Mittag (12 Uhr Ortszeit)**, wenn die Sonne ihren höchsten Stand am Himmel hat, d. h. wenn sie im Meridian des Beobachtungsortes, also im Süden, steht. **Mittag** nach **globaler Weltzeit** ist es dagegen, wenn die **fiktive mittlere Sonne** im Meridian des Beobachtungsortes steht. Die mittlere Sonnenzeit wird dann längs des Himmelsäquators nach Westen durch Angabe des Stundenwinkels gemessen. Sie ändert sich mit $15^\circ/\text{h}$, entsprechend 86400 s/d. Man muss also zwischen dem **wahren** und dem **mittleren Sonnentag** unterscheiden. Die lokale mittlere Sonnenzeit ist dementsprechend der Stundenwinkel der mittleren Sonne **plus 12 Stunden**. **Weltzeit UT** bezieht sich dann auf den Greenwich-Meridian.

Die Dauer des wahren Sonnentages variiert jahreszeitlich. Das ist eine Folge sowohl der **Exzentrizität der Erdbahn** als auch der **Schiefe der Ekliptik**. Wegen der Exzentrizität der ellipsenförmigen Erdbahn werden nach dem zweiten Keplerschen Gesetz (dem Flächensatz) einzelne Teile der Erdbahn unterschiedlich schnell durchlaufen, so dass auch die Sonne sich im Jahresverlauf unterschiedlich schnell gegenüber dem Sternenhimmel bewegt. Da die Zeit des Durchlaufs vom Perihel zum Aphel gleich der Zeit des Durchlaufs vom Aphel zum Perihel ist, bewirkt die **Exzentrizität** eine **halbjährliche Schwankung** der wahren Tageslänge, ist also $\sim \sin 2\delta$. Man definiert daher, wie schon erwähnt, eine **Dynamical Mean Sun (DMS)**, die sich auf einer Kreisbahn gleichmäßig in der Ekliptik bewegt. Die **Projektion** dieser DMS in die Äquatorebene bewegt sich aber nicht gleichförmig in der Äquatorebene, sondern erfährt eine **jährliche Schwankung** $\sim \sin \delta$. Der entsprechende sich im Äquator gleichmäßig fortbewegende Punkt ist so definiert, dass er **in den Äquinoktien mit der Lage der DMS** übereinstimmt. Dieser Punkt heißt **fictional mean sun**, bzw. **Universal Mean Sun (USM)**. Während die Lage der dynamischen Sonne also in den **Solstizien** mit der Lage der wahren Sonne an der Himmelskugel übereinstimmt, stimmt die Lage der fiktiven mittleren Sonne USM in den **Äquinoktien** mit der Lage der dynamischen Sonne überein.

Die Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit wird als **Zeitgleichung** bezeichnet. Wegen der Überlagerung der beiden Effekte mit unterschiedlicher Periodenlänge und unterschiedlicher Nulllage ergeben sich pro Jahr zwei Minima und zwei Maxima der Zeitgleichung:

~ 11. Feb. ~ -14.5 m
~ 14. Mai ~ 4 m
~ 26. Juli ~ -6.4 m
~ 3. Nov. ~ 16.3 m.

Die Zeitgleichung bewirkt auch asymmetrische Verschiebungen von Sonnenauf- und Sonnenuntergangszeiten. So findet z.B. der früheste Sonnenuntergang nicht bei der Wintersonnenwende am 22. Dezember statt, sondern etwa 11 Tage zuvor. Der späteste Sonnenaufgang kommt dagegen rund 10 Tage nach der Wintersonnenwende. Aus demselben Grund sind Vor- und Nachmittag auch z. B. bei den Tag- und Nachtgleichen am 21. März und 23. September nicht gleich lang.