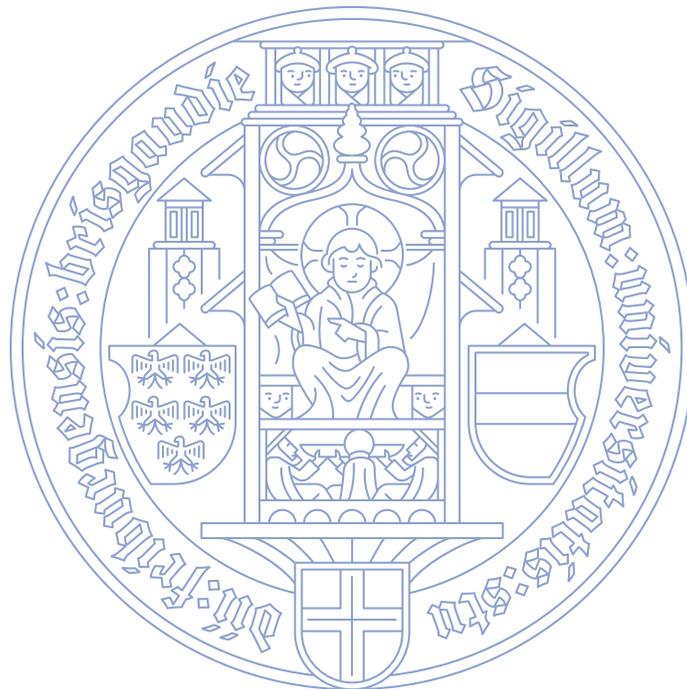


Zeitsysteme

Physikdidaktik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

28.03.2024

Professor Dr. Thomas Filk



Weitere Kurztexte hier: <https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/kurztexte/>

universität freiburg



Inhaltsverzeichnis

1	Zeitsysteme	3
1.1	Das Julianische Datum	3
1.2	Die Ephemeridenzeit - ET	4
1.3	TT, TCG und TCB	5
1.4	Die Internationale Atomzeit - TAI	5
1.5	Universal Times - UT0, UT1, UT2	6
1.6	Universal Coordinated Time - UTC	7
1.7	Lokalzeit - Local Time	8
1.8	GPS Time	8
1.9	Kuriositäten	9
1.9.1	Die Datumsgrenze	9
1.9.2	Verschiebung der Datumsgrenze zum Millenium	10

Kapitel 1

Zeitsysteme

Autor: Thomas Filk, Version vom: 28.03.2024

Seit 1967 ist die Sekunde durch die Frequenz $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ des Hyperfeinstrukturübergangs in 133-Cäsium im Grundzustand definiert. Es gilt:

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 T = 9\,192\,631\,770 \frac{1}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} . \quad (1.1)$$

T ist die Periodenlänge einer Schwingung zu diesem Übergang. Die Definition der Sekunde über den Hyperfeinstrukturübergang in 133-Cäsium löste 1967 die Ephemeridensekunde ab, die über die Position der Erde relativ zur Sonne definiert war.

Man könnte meinen, dass mit der Definition der SI-Sekunde und der Konstruktion von Uhren, die diese Sekunde genau genug messen können, das Problem der Zeitmessung gelöst sei. Im Detail ergeben sich jedoch Probleme, die zu verschiedenen Zeitsystemen geführt haben. Zum einen muss man zwischen theoretischen Zeitsystemen, die auf idealen Uhren basieren, und den Realisierungen solcher Zeitsysteme durch tatsächlich existierende und mit Fehlern behaftete Uhren unterscheiden. In diesem Zusammenhang ist zu definieren, wie man aus den fehlerbehafteten Werten realer Messinstrumente eine Zeitskala definiert kann. Außerdem muss man einen Referenzpunkt wählen, da nach der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie Uhren an verschiedenen Orten (im Gravitationsfeld) oder in verschiedenen Bewegungszuständen unterschiedliche Zeitsysteme definieren. Und schließlich möchte man natürlich, dass die Zeitsysteme trotz ihrer derzeitigen Definition über atomare Eigenschaften noch etwas mit dem Tag-und-Nacht-Rhythmus der Erde zu tun haben.

Auch heute noch sind verschiedene Zeitsysteme in Gebrauch. Die folgende Liste bzw. Behandlung dieser Zeitsysteme kann daher nur einen groben Überblick geben.

1.1 Das Julianische Datum

Die Julianische Tageszählung (englisch *Julian day*) zählt, unabhängig von einem speziellen Kalender oder der Definition eines Jahres, die Tage seit einem Anfangsdatum, das als der 1. Januar des Jahres 4713 v. Chr. nach dem zurückextrapolierten Julianischen Kalender gewählt wird. Genauer beginnt diese Zählung mittags um 12 Uhr (Sonnenhöchststand am heutigen Nullmeridian durch Greenwich). Wählt man nicht den zurückgerechneten Julianischen Kalender sondern den zurückgerechneten Gregorianischen Kalender, so beginnt diese Zeitrechnung mit dem 24. November des Jahres 4714 v. Chr. Und da es weder im Julianischen noch im Gregorianischen Kalender das Jahr 0 gibt, entspricht das Jahr 4713 dem Jahr -4712 im astronomischen Kalender, der das Jahr 0 hinzunimmt.

Die Wahl dieses Datums hat historische Gründe. Zunächst werden hier drei Zyklen zu einer Epoche zusammengefasst: Der Menton-Zyklus oder Mondzyklus von 19 Jahren, der Sonnenzyklus von 28 Jahren¹ und der sogenannte Indiktionszyklus von 15 Jahren (ein Zyklus, der im Altertum und Mittelalter oft verwendet wurde und ursprünglich mit Neuberechnungen der Steuern einherging). Das Produkt dieser drei Zyklenlängen sind 7980 Jahre; dies bezeichnet man als eine Epoche. Das Jahr 4713 v.Chr. wurde im Mittelalter errechnet als ein Jahr, in dem alle drei genannten Zyklen nach damaliger Rechnung begannen. Es hat den Vorteil, dass es vor jeder historischen Datierung liegt, d.h. es gibt keine datierten historischen Ereignisse vor diesem Jahr (außer astronomische Ereignisse, die man heute zurückrechnen kann).

Dem Julianische Tag, der am 1. Januar 2000 mittags 12 Uhr (Universal time im Gregorianischen Kalender) begann, entspricht nach der Julianischen Tageszählung der Tag 2 451 545. Soviel Tage sind seit dem 1. Januar 4713 v. Chr. nach dem zurückgerechneten Julianischen Kalender vergangen. Diese Zählung ist so einfach, dass sie nicht nur in der Astronomie gerne verwendet wird, sondern auch in abgewandelter Form in vielen Computersystemen.

Will man neben dem Tag auch die Uhrzeit berücksichtigen, werden Nachkommastellen angegeben. Der Tag hat 86 400 Sekunden, sodass der 1. Januar 2000, 22 Uhr 25 Minuten und 10 Sekunden dem Julianischen Datum 2 451 545,43414 entspricht. Sowohl die Julianische Tageszählung (im Englischen *Julian Day*) als auch das Julianische Datum (*Julian Date*) werden mit JD abgekürzt. Man beachte, dass diese Tageszählung abgesehen von der Angabe des Anfangsdatums nicht davon abhängt, ob ansonsten der Julianische oder Gregorianische Kalender (oder welcher andere Kalender auch immer) verwendet wird.

Eine häufig verwendete Abwandlung ist das sogenannte Modifizierte Julianische Datum, abgekürzt mit MJD. Dies wird beispielsweise auch von dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) in seinen *Circular T*, den monatlichen Berichten zur Bestimmung der Internationalen Atomzeit TAI, verwendet. Das MJD unterscheidet sich vom JD in zwei Punkten:

1. Der Tagesanfang wird auf 0 Uhr Mitternacht (statt auf 12 Uhr mittags) gelegt.
2. Der Beginn ist 0 Uhr, 17. November 1858. Das bedeutet, vom Julianischen Tag werden 2 400 000,5 Tage abgezogen: $MJD = JD - 2\,400\,000,5$.

Damit hat der 1. Januar 2000, 12 Uhr mittags, den Wert: $MJD = 51\,544,5$.

1.2 Die Ephemeridenzeit - ET

Die Sekunde als der 1/86 400-ste Teil eines Tages ist erst seit dem Mittelalter in Gebrauch und bis 1956 war die Sekunde als der 1/86 400-ste Teil eines mittleren Sonnentages definiert. Man wusste zu diesem Zeitpunkt allerdings schon, dass auch der mittlere Sonnentag nicht wirklich vollkommen gleichmäßig verläuft bzw. dass der mittlere Sonnentag davon abhängt, über welchen Zeitraum genau gemittelt wird. Daher verwendete man schon seit längerem die Stellung der Erde relativ zur Sonne zur Definition einer Sekunde. So war in der Zeit zwischen 1956 und 1968 die Sekunde definiert als der 1/31 556 925,9747-ste Teil des tropischen Jahres 1900 (genauer: des theoretisch hochgerechneten tropischen Jahres 1900, bestimmt aus den Bahndaten der Erde zum Zeitpunkt 31.12.1899, mittags 12 Uhr). Diese Definition der Sekunde bezeichnet man auch als die Ephemeridensekunde.

¹Im Julianischen Kalender haben 4 Jahre - die Periode dieser Kalenderzählung - eine Dauer von 1461 Tagen, dabei verschieben sich die Wochentage um 5 Tage - der Rest bei einer Teilung von 1461 durch 7. Alle $4 \times 7 = 28$ Jahre fallen also die Wochentage wieder auf dasselbe Datum. Im Gregorianischen Kalender entspricht eine Periode 400 Jahren mit 146 097 Tagen. Dies ist glatt durch 7 teilbar, d.h. alle 400 Jahre fallen im Gregorianischen Kalender dieselben Daten wieder auf dieselben Wochentage.

Schon in babylonischer Zeit (um 1000 v. Chr.) gab es Tabellen zu den Positionen von Sonne, Mond und Planeten, und der sogenannte Almagest von Ptolemäus mit seinen genauen Beschreibungen der Planetenbahnen gilt als Höhepunkt antiker Astronomie. Im Mittelalter wurden weitere Tabellen erstellt (bekannt sind die Toledaner Tafeln aus dem 12. Jahrhundert, die Alfonsinischen Tafeln aus dem 13. Jahrhundert, die Ephemeridentafeln von Regiomontanus von 1474, oder auch die Rudolfinischen Tafeln von 1627 von Johannes Kepler).

Seit dem Mittelalter gab es Tabellen, in denen die Position der Sonne, des Mondes und der Planeten relativ zu einem Koordinatensystem (meist durch Angabe der Rektazension und Deklination) und/oder relativ zueinander mit Daten und Tageszeiten korreliert wurden.

1.3 TT, TCG und TCB

TT (*Terrestrial Time* oder *Temps terrestre*), TCG (*Geocentric Coordinated Time* oder *Temps-coordonnée géocentrique*) und TCB (*Barycentric Coordinate Time* oder *Temps-coordonnée barycentrique*) sind idealisierte Zeitsysteme, manchmal spricht man auch von Platonischen Zeitsystemen, die auf idealen Uhren unabhängig von konkreten Realisierungen beruhen. Sie dienen meist der theoretischen Beschreibung von Objekten in unserem Sonnensystem.

TCB (baryzentrische koordinierte Zeit) ist die Zeit einer idealen, die SI-Sekunde anzeigenden Uhr, die sich in einem idealisierten hypothetischen System befindet, das sich parallel zum Schwerpunkt (dem Baryzentrum) des Sonnensystems bewegt, also dieselben Bewegungen wie dieser Schwerpunkt ausführt, aber keinem Gravitationspotenzial unterliegt. Es wird typischerweise für die Beschreibung von Bahnkurven von Planeten oder Kometen verwendet sowie von Raketen oder Satelliten, die den gravitativen Einfluss der Erde verlassen. Entsprechend ist TCG (geozentrische koordinierte Zeit) die Zeit einer idealen, die SI-Sekunde anzeigenden Uhr, die sich in einem idealisierten System befindet, das sich parallel zum Schwerpunkt des Erdmittelpunkts bewegt, aber keinem Gravitationspotenzial unterliegt. Sie dient zur Beschreibung von Bahnkurven im gravitativen Einfluss der Erde, beispielsweise den Bahnkurven von Satelliten, dem Mond oder Raketen.

TT (terrestrische Zeit) ist die Zeit einer idealen Uhr, die sich auf der Oberfläche der Erde befindet. Hierbei ist die Oberfläche definiert durch die gravitative Äquipotentialfläche (also konstantes Gravitationspotenzial) zur mittleren Meereshöhe, wobei der Effekt der Erddrehung (Potenzial zur Fliehkraft) einbezogen wird, nicht jedoch der Einfluss von Strömungen oder Gezeiten. Diese Fläche bezeichnet man auch als das Geoid der Erde. Da die mittlere Meereshöhe (z.B. im Zusammenhang mit dem Klimawandel) keine Konstante ist, hat man für das Potenzial den Wert $U/c^2 = 6,969\,290\,134 \cdot 10^{-10}$ definiert (der Quotient aus einem Potenzial und c^2 ist eine dimensionslose Konstante), was bei einer homogenen Kugel von der Masse der Erde einem Radius von etwas über 6 360 km entspricht.

TT und TCG unterscheiden sich also um einen multiplikativen Faktor $(1 - U/c^2)$, um den TT langsamer ist als TCG. Außerdem wurde definiert, dass die beiden Zeiten am 1. Januar 1977, um 0 Uhr 32,184 Sekunden, gleich waren. Die seltsame Sekundenzahl ergibt sich daraus, dass TT möglichst exakt an die vorher gebräuchliche Ephemeridenzeit angepasst werden sollte. Außerdem entspricht diese Zeit exakt 0 Uhr nach der Internationalen Atomzeit TAI (siehe nächsten Abschnitt). Früher verwendete man für die terrestrische Zeit TT die Bezeichnung TDT (terrestrial dynamical time); diese Bezeichnung findet man gelegentlich immer noch.

1.4 Die Internationale Atomzeit - TAI

Die Internationale Atomzeit TAI (*Temps atomique international*) ist eine Realisierung von TT. Hierbei handelt es sich um eine Zeit, die an existierenden Uhren abgelesen wird. Da eine einzelne Uhr

immer ungenau ist und auch mal Störungen haben kann, handelt es sich bei TAI um einen gewichteten Mittelwert von derzeit über 400 hoch präzisen Uhren an über 80 Orten. In der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig stehen zwei solche Atomuhren - genannt CSF1 und CSF2, hierbei handelt es sich um Cäsium Fountain Clocks -, die zur TAI beitragen. In regelmässigen Abständen übermitteln diese Uhren ihre Zeiten an das BIPM. Dort werden die Daten um verschiedene Faktoren korrigiert (dazu zählen Laufzeiten der Übertragung sowie relativistische Korrekturen aufgrund der Höhenunterschiede der verschiedenen Uhren), die Uhren mit den größten Abweichungen werden nicht berücksichtigt und von rund 300 Uhren wird ein gewichtetes Mittel gebildet. Die Gewichtung der einzelnen Uhren richtet sich nach ihrem geschätzten Fehler (der sich aus einer Theorie ihrer Funktionsweise bestimmt) sowie Ungenauigkeiten oder Schwankungen in der Vergangenheit. Einmal im Monat wird im *BIPM Circular T* veröffentlicht, um wie viel die einzelnen Uhren von dem berechneten Mittelwert zu bestimmten Zeitpunkten (die dann rund einen Monat zurückliegen) abwichen.

TAI versucht also eine möglichst genaue Realisation einer idealen, die SI-Sekunde anzeigenden Uhr zu sein, die sich auf der Oberfläche des Geoids befindet. Insofern ist sie eine Realisation von TT, bis auf die oben erwähnten 32,184 Sekunden, um die sich die beiden Zeiten am 1. Januar 1977, 0 Uhr (TAI-Zeit), unterscheiden. TT sollte dabei an die Ephemeridenzeit angepasst werden, an die TAI schon 1958 angepasst worden war. Die 32,184 Sekunden Unterschied erklären sich also daher, dass zwischen diesen beiden Zeitpunkten (1958 und 1977) schon ein solcher Unterschied zwischen der Atomzeit und der Ephemeridenzeit bestand.

1.5 Universal Times - UT0, UT1, UT2

Die Universal Times beziehen sich direkt auf die Lage der Erde und sind somit eine Fortführung der Ephemeridenzeit. Die Universal Time ist definiert über den Winkel, den der Nullmeridian auf der Erde relativ zu einem ausgezeichneten Punkt auf dem Himmelsäquator (der Projektion des Erdäquators vom Mittelpunkt der Erde aus auf die Himmelskugel) hat. Dieser Punkt auf dem Himmelsäquator ist heute definiert über ein Referenzsystem am Himmel, das über die Lage von festen Punkten am Himmel - meist Quasare, die auch im Radiowellenbereich nachweisbar sind, sodass eine VLBI (Very Long Baseline Interferometry) eine sehr genaue Richtungsbestimmung auch am Tag ermöglicht - definiert ist. Dieses Referenzsystem bezeichnet man auch als ICRF (*International Celestial Reference Frame*).

Die Ephemeridenzeit bezog sich auf einen gemittelten Tag, wie er durch das (vom 31.12.1899, 12 Uhr, hochgerechnete) Jahr 1900 definiert war. Diese Zeit nannte man auch GMT (*Greenwich Mean Time*). Sie entspricht genau dem, was man später UT0 nannte: Eine Zeitbestimmung über einen gemittelten Sonnentag, also die Zeit eines realen Sonntags, die durch die Zeitgleichung - also die Einflüsse der elliptische Bahn der Erde sowie ihrer Neigung gegenüber der Ekliptik - korrigiert wird und somit zur Zeit eines mittleren Sonntags gehört. Der Winkel ERA (*Earth Rotation Angle*) des Nullmeridians relativ zu dem Referenzsystem am Himmel ist bis auf eine Konstante direkt proportional zur UT. Die Proportionalitätskonstante berücksichtigt, dass es sich hierbei um eine Messung der Erdrotation relativ zu einem Himmelssystem (siderischen Referenzsystem) handelt, und diese Zeit korrigiert werden muss, um einen Sonnentag zu erhalten. Dementsprechend entspricht dieser Proportionalitätsfaktor ziemlich genau dem Faktor $(1 + 1/365,25)$, um den der siderische Tag im Vergleich zum Sonnentag korrigiert werden muss. Genauer lautet die Beziehung:

$$\text{ERA} = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448 \cdot T_{\text{u}}) \text{ rad}, \quad (1.2)$$

wobei $T_{\text{u}} = (\text{JD}(\text{UT1}) - 2451\,545,0)$ ist, und $\text{JD}(\text{UT1})$ dem Julianischen Datum nach der UT1-

Uhrzeit entspricht. ERA ist die gemessene Variable (ein Winkel) und JD(UT1) - ein Datum mit einem Zeitpunkt - wird daraus berechnet. ERA, also der gemessene Winkel, wird dabei um zwei Faktoren korrigiert: (1) die Zeitgleichung, die den Unterschied zwischen mittlerem und wahren Sonntag angibt, und (2) Schwankungen in der Drehachse der Erde (sogenannte Polarbewegungen), durch die der Längengrad, beispielsweise eines Observatoriums, nicht eindeutig bestimmt ist. Weitere jahreszeitliche Schwankungen, die beispielsweise in dem Zeitsystem UT2 berücksichtigt werden, werden für UT1 nicht berücksichtigt.

1.6 Universal Coordinated Time - UTC

Wir haben nun zwei realisierte Zeitsysteme (d.h., Zeitsysteme, die durch Messungen an realen physikalischen Systemen bestimmt werden): Die TAI, die über Atomuhren bestimmt wird, die möglichst nahe an der SI-Sekunde arbeiten, und UT1, die über die Lage der Erde relativ zur Sonne bestimmt wird. UT1 hat den Vorteil, dass 12 Uhr mittags mit unserer Vorstellung von „Sonnenhöchststand“ zusammenfällt, wohingegen TAI auf einer möglichst genauen und gleichmäßigen Realisierung einer Sekunde beruht. Damit entsteht das Problem: An welches Zeitsystem sollen wir uns halten, wenn diese beiden Zeitsysteme auseinanderlaufen. UT1 hat den Vorteil, unseren Vorstellung von Tag und Nacht zu entsprechen, TAI hat den Vorteil, dass die Sekunden immer gleich lang sind.

Um ein Auseinanderlaufen der beiden Zeitsysteme auszugleichen, hat man sich (nach anfänglichen Problemen bei der Namensgebung wie auch bei der genauen Definition) 1972 auf das Zeitsystem der UTC (*Universal Coordinated Time*) geeinigt. UTC verläuft parallel zu TAI, d.h., UTC richtet sich bezüglich der genauen Zeitangabe nach der besten Realisierung der SI-Sekunde auf der Erdoberfläche, und das ist die TAI. Bevor allerdings UT1 und TAI um 0,9 Sekunden auseinanderlaufen (weil die Erddrehung gewissen Schwankungen unterworfen ist), wird für UTC eine Schaltsekunde entweder eingefügt oder weggelassen. In der Vergangenheit wurden nur Schaltsekunden eingefügt, da die Erdrotation etwas langsamer ist als die TAI-Zeit. Als UTC im Jahre 1972 eingeführt wurde bestand schon ein Unterschied von 10 Sekunden zwischen UT1 und TAI, sodass damals definiert wurde $UTC = TAI - 10\text{ s}$. Seitdem wurden insgesamt 27 weitere Schaltsekunden eingefügt, die letzte am 31. Dezember 2016. Sämtliche Schaltsekunden wurden in der Vergangenheit entweder am 31. Juni oder am 31. Dezember eingefügt. In den letzten Jahren hat die Geschwindigkeit der Eigendrehung der Erde wieder etwas zugenommen, sodass nicht ausgeschlossen wird, dass in der nahen Zukunft zum ersten Mal in der Geschichte der UTC eine Sekunde „herausgenommen“ wird.

Das Einfügen von Schaltsekunden führte dazu, dass im Zeitsystem der UTC gelegentlich eine Minute 61 Sekunden hat. Statt nach der 59.-sten Sekunde die 0.te Sekunde folgen zu lassen, zählt man eine 60.ste Sekunde hinzu und beginnt dann den neuen Monat mit der Sekunde 0. Da in der Vergangenheit noch nie eine Schaltsekunde entfernt wurde, gibt es gewisse Bedenken, ob alle Computersysteme mit einem solchen Schritt zurecht kommen. Da auch beim Einfügen von Schaltsekunden in der Vergangenheit immer wieder Probleme mit verschiedenen digitalen Systemen auftraten, wurde in jüngerer Zeit überlegt, die Definition von UTC nochmals zu ändern. Es wird angestrebt, bis 2035 eine neue Definition zu finden, bei der nur alle paar Jahrhunderte eine Korrektur notwendig wird [1]. Beispielsweise könnte man die Differenz zwischen UT1 und TAI auf mehrere Minuten anwachsen lassen, bevor Korrekturen vorgenommen werden. Rein subjektiv werden wir als Menschen die langsame Verschiebung der Mittagsstunde ohnehin erst bemerken, wenn sich die Differenz auf die Größenordnung einer Stunde summiert hat.

Die UTC ist die Zeit, die wir beispielsweise über Funkuhren, das Radio oder Fernsehen empfangen. Diese Zeit ist bis auf 0,9 Sekunden an die Orientierung der Erde relativ zum Referenzsystem des Himmels angepasst, läuft parallel zur Atomzeit TAI, d.h. ist sehr regelmäßig, hat aber den Nach-

teil, dass eine Minute gelegentlich eine Sekunde mehr oder weniger hat. Wegen der Unregelmäßigkeit der Erddrehung können Schaltsekunden nicht langfristig vorhergesagt werden, sondern erst in einem Zeitraum von einem halben Jahr.

1.7 Lokalzeit - Local Time

Die Lokalzeit ist die Zeit, die von Radio- oder Fernsehstationen, Funkuhren bzw. öffentlichen Uhren an einem Ort angezeigt wird. Sie richtet sich nach der UTC, unterliegt also unter anderem der Einfügung oder Löschung von Schaltsekunden, unterscheidet sich von der UTC aber in zweierlei Hinsicht:

1. Sie berücksichtigt die lokale Zeitzone: UTC ist die Fortsetzung der GMT (Greenwich Mean Time) und richtet sich nach dem Nullmeridian durch Greenwich, d.h. nach dem Längengrad, wo im Jahresmittel mittags um 12 Uhr die Sonne ihren Höchststand hat. Damit man an nahezu allen Orten um die Mittagszeit den Sonnenhöchststand hat, wurde die Erde in Zeitzonen eingeteilt, die einseits von Längengraden, andererseits aber auch von Ländergrenzen berandet sind. Die meisten Zeitzonen unterscheiden sich von der Zeitzone von Greenwich um ein Vielfaches einer vollen Stunde. Alle 15 Längengrade beginnt also rein rechnerisch eine neue Zeitzone, wobei die meisten Länder (Ausnahmen sind die USA, Kanada, Russland und Australien) nur eine Zeitzone haben, was z.B. für China bedeutet, dass es sich rechnerisch über fast vier Zeitzonen erstreckt aber im gesamten Land dieselbe Zeitzone gilt. Es gibt aber auch einige Länder mit halbstündiger Zeitverschiebung (Iran $+3\frac{1}{2}$, Afghanistan $+4\frac{1}{2}$, Indien $+5\frac{1}{2}$, Burma $+6\frac{1}{2}$, Zentralaustralien $+9\frac{1}{2}$) sowie viertelstündiger Zeitverschiebung (Nepal $+5\frac{3}{4}$, kleine Teile von Australien $+8\frac{3}{4}$ sowie die Chatham Islands $+10\frac{3}{4}$).

Zentraleuropa (mit Ausnahme von Portugal und den Inselgruppen Kanaren, Madeira, Island und Azoren) verwenden die Mitteleuropäische Zeit (MEZ), die sich von der UTC um +1 Stunde unterscheidet, d.h., wenn es in Greenwich 12 Uhr mittags ist, ist es in Mitteleuropa bereits 1 Uhr mittags.

2. In den Sommermonaten wechseln viele Länder auf die Sommerzeit. Dazu verschiebt man die Zeitzone um eine weitere Stunde nach Osten, d.h., relativ zum Sonnenstand ist es eine Stunde später. Damit verbunden ist etwas längere Dunkelheit am Morgen und etwas längere Helligkeit am Abend. In diesem Fall spricht man in Mitteleuropa von der MESZ - Mitteleuropäische Sommerzeit, die sich von der UTC um +2 Stunden unterscheidet.

Ungefähr entlang des 180-sten Längengrads (im Pazifik, durch die Fiji-Inseln) verläuft die Internationale Datumsgrenze. Überquert man diese Grenze von West nach Ost, muss man das Datum um einen Tag zurückstellen, überquert man sie von Ost nach West stellt man das Datum um einen Tag vor.

1.8 GPS Time

Abschließend soll noch kurz auf die GPS-Zeit des Global Positioning Systems (GPS) eingegangen werden. Das GPS besteht unter anderem aus 24 aktiven Satelliten (es befinden sich derzeit - Dezember 2022 - 32 Satelliten im Orbit, davon sind 31 einsatzbereit, sieben der Satelliten dienen als Backup), die ständig ein Signal aussenden, das die genaue Zeit sowie den genauen Ort dieser Satelliten angibt. Mindestens vier dieser Satelliten befinden sich jederzeit in „Sichtlinie“ von jedem beliebigen Punkt der Erde aus. Aus den Signalen kann ein geeigneter Empfänger seine genaue Position sowie die genaue Zeit bestimmen.

Die vom GPS-System verwendete GPS-Zeit richtet sich im Wesentlichen nach der TAI, d.h. es wird die auf das Geoid der Erde bezogene Eigenzeit verwendet, ohne Einschub oder Wegnahme von Schaltsekunden. Das bedeutet unter anderem, dass die Uhren in den GPS-Satelliten „falsch gehen“: Es handelt sich nicht um SI-Uhren, die die Eigenzeit in dem Satelliten messen, sondern diese Eigenzeiten werden um die relativistischen Effekte aufgrund der Bewegung des Satelliten sowie des Gravitationsfelds der Erde korrigiert, sodass diese Uhren die Zeit angeben, die an einem ruhenden Ort auf dem Geoid der Erde gilt. Damit stimmen diese Uhren in ihrem Zeittakt mit der Atomzeit TAI überein.

Als Startpunkt der GPS-Zeit wurde 0 Uhr am 6. Januar 1980 festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt unterschieden sich UTC und TAI bereits um 19 Schaltsekunden. Da die GPS-Zeit zu diesem Zeitpunkt an die UTC angepasst wurde, unterscheiden sich GPS-Zeit und TAI also dauerhaft um 19 Sekunden: $\text{GPS} = \text{TAI} - 19\text{s}$. Derzeit (Dezember 2022) unterscheiden sich UTC und GPS-Zeit um 18 Sekunden; diese 18 Sekunden wurden seit dem 6. Januar 1980 bei der UTC als Schaltsekunden eingefügt. Damit geht UTC relativ zur GPS-Zeit um 18 Sekunden nach, d.h. es gilt: $\text{GPS} = \text{UTC} + 18\text{s}$. Diese Zeitdifferenz ändert sich aber, falls bei der UTC Schaltsekunden eingefügt oder weggelassen werden.

Die Zählung bei der GPS-Zeit verwendet mehrere Einheiten: Epochen, Wochen, Tage und Sekunden.

1. Eine Epoche besteht aus 1024 Wochen. Die Wochenzahl wird als 10-Bit Zeichenfolge übertragen. Der Woche 1023 folgt die Woche 0. Dies bezeichnet man auch als Rollover. Eine Epoche dauert somit 7168 Tage oder etwas über 19,6 Jahre. Da diese Rollover (bisher fanden zwei solche Rollover statt - in der Nacht vom 21. auf den 22. August 1999 und in der Nacht vom 6. auf den 7. April 2019) zu Problemen bei manchen Anwendern geführt haben, will man in naher Zukunft die Zeichenfolge für die Wochen auf 13 Bit erweitern, sodass nur ungefähr alle 157 Jahre ein solcher Rollover stattfindet. Derzeit (am 11. Dezember 2022) befinden wir uns in der GPS-Woche 2240 (dies ist die Anzahl der Wochen, die seit dem 6. Januar 1980 vergangen sind), also in der 192. Woche der Epoche 2.
2. Die Wochen werden mit Beginn vom 6. Januar 1980 gezählt. Da es jedoch derzeit noch wegen der 10-Bit-Folge für die Angabe der Wochen zu Rollover kommt, gibt die GPS-Zeit nur die Wochenzahl der laufenden Epoche wieder (am 11. Dezember 2022 war das die Woche 192).
3. Für jede Woche wird der Tag angegeben, also ein Wert zwischen 0 und 6. Die neue Woche beginnt mit dem Sonntag, dem Tag 0.
4. Für jeden Tag werden die Sekunden angegeben. Der Tag beginnt um Mitternacht 0 Uhr.

Damit besteht eine volle Angabe der GPS-Zeit aus: Wochenzahl (gesamt), Epoche + Woche innerhalb der Epoche (ein Wert zwischen 0 und 1023), Tag (ein Wert zwischen 0 und 6) und Sekunden an diesem Tag (ein Wert zwischen 0 und 86399). Die Gesamtzahl der Wochen bzw. die Epoche wird allerdings nicht im GPS-Signal kodiert. Der Empfänger bzw. Anwender muss also wissen, in welcher Epoche man sich befindet.

1.9 Kuriositäten

1.9.1 Die Datumsgrenze

Es wurde oben erwähnt, dass man bei der Überquerung der Datumsgrenze von West nach Ost das Datum um einen Tag zurückstellen muss (also 24 Stunden subtrahieren muss), bei der Überquerung von Ost nach West muss das Datum entsprechend um einen Tag vorgestellt werden. Als Scherzfrage

für Kinder in den unteren Klassen bietet sich nun folgendes Gedankenexperiment an: Angenommen, man könnte mit einem sehr schnellen Flugzeug immer von West nach Ost um die Erde reisen und dabei die Datumsgrenze in kurzer Zeit mehrfach von West nach Ost überqueren, dann würde man jedesmal das Datum um einen Tag zurücksetzen. Kann man auf diese Weise in die Vergangenheit reisen, also ist man beispielsweise nach fünfmaliger Überquerung der Datumsgrenze um fünf Tage zurückgereist? Eine ähnliche Frage kann man natürlich auch bezüglich der Reisen in die Zukunft stellen, da man bei Reisen um die Erde von Ost nach West jedesmal beim Überqueren der Datumsgrenze das Datum um einen Tag vorstellen muss.

Natürlich geht das nicht: Wenn man von West nach Ost reist muss man ja jedesmal, wenn man in eine neue Zeitzone gelangt, die Uhr um eine Stunde vorstellen. Hat man die Erde dann einmal umrundet, wurde die Uhr um insgesamt 24 Stunden vorgestellt. Beim Überqueren der Datumsgrenze gleicht man dies wieder aus, indem die Uhr um 24 Stunden zurückgesetzt bzw. das Datum um 1 Tag zurückgesetzt wird.

1.9.2 Verschiebung der Datumsgrenze zum Millenium

Die Kiribati Inseln (offiziell die Republik Kiribati) bilden eine Inselgruppe in der Mitte des Pazifiks, die sich entlang des Äquators vom ungefähr 170. Längengrad Ost (die Insel Banaba, westlich der Gilbert Islands) bis zum 150. Längengrad West (die Insel Caroline, heute Millenium Island, in der Inselgruppe der Line Islands) erstreckt. Die Datumsgrenze verlief bis Mitte der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts durch diese Inselgruppe, sodass auf verschiedenen Inseln zum selben Zeitpunkt ein unterschiedliches Datum herrschte. Zum 1. Januar 1995 wurde die Datumsgrenze von der Republik Kiribati so verlegt, dass sie nun östlich um die Line Inseln herumläuft und damit zwei Zeitzonen in das alte Datum hineinragt (das bei Inseln in der Nähe, z.B. auch auf Hawaii, das auf demselben Längengrad liegt, gültig ist). Als offizieller Grund wurde angegeben, dass ein unterschiedliches Datum innerhalb eines Landes zu Problemen in landesübergreifenden Angelegenheiten führe. Inoffiziell wurde allerdings auch nie bestritten, dass ein wirtschaftlicher Grund dahinter steckte: Auf diese Weise wurden die Line Islands die ersten Gebiete, die zum Millenium ins neue Jahrtausend wechselten. Man erhoffte sich dadurch als touristische Attraktion das erste Land der Welt zu sein, in dem der Sonnenaufgang im neuen Jahrtausend beobachtet werden konnte.

Literaturverzeichnis

- [1] Resolution 4 of the 27th CGPM (General Conference on Weights and Measures) 2022 <https://www.bipm.org/en/cgpm-2022/resolution-4>

Index

- Almagest (Ptolemäus), 5
- BIPM, Bureau International des Poids et Mesures, 4
- Circular T, 4
- Datumsgrenze, 8, 9
- Ephemeridensekunde, 4
- Ephemeridentabellen, 5
- Ephemeridenzeit, 4
- Epoche, 9
- ERA, Earth Rotation Angle, 6
- GMT, Greenwich Mean Time, 6
- GPS, Global Positioning System, 8
- GPS-Zeit, 8
- Hyperfeinstrukturübergang, 3
- ICRF, International Celestial Reference Frame, 6
- Indiktionszyklus, 4
- Julianische Tageszählung, 3
- Julianisches Datum, 4
 - Modifiziertes, 4
- Kiribati Inseln, 10
- Lokalzeit, 8
- Meereshöhe, mittlere, 5
- Menton-Zyklus, 4
- MESZ, Mitteleuropäische Sommerzeit, 8
- MEZ, mitteleuropäische Zeit, 8
- PTB, Physikalisch Technische Bundesanstalt, 6
- Rollover, 9
- Schaltsekunde, 7
- Sekunde, 3
- Sommerzeit, 8
- Sonnenzyklus, 4
- TAI, internationale Atomzeit, 5
- TCB, baryzentrisch koordinierte Zeit, 5
- TCG, geozentrisch koordinierte Zeit, 5
- TDT, terrestrial dynamical time, 5
- TT, terrestrische Zeit, 5
- UT, Universal Times, 6
- UTC, Universal Coordinated Time, 7
- Woche, 9
- Zeitsystem
 - Platonisches, 5
- Zeitsysteme, 3–10
- Zeitzone, 8