Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 53 (1995)
Heft: 267

Artikel: Die Einheit der Zeit heisst Sekunde : eine Sekunde ist ...
Autor: Wirz, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898711

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 19.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Einheit der Zeit heisst Sekunde Eine Sekunde ist...*

P. WIRZ

Als ich ins Gymnasium ging, habe ich im Physikunterricht gelernt:

«Die Einheit der Zeit heisst Sekunde. Eine Sekunde ist der 86400-ste Teil eines mittleren Sonnentages.»

Als ich 30 Jahre später selbst Physiklehrer war, habe ich meinen Studenten gesagt:

«Eine Sekunde ist der 31'556'925,9747-ste Teil des ... Jahres... 1900.» Das ist, wie einige Leser wohl bemerken, ein wenig vereinfacht; ich habe nicht die ganze Wahrheit gesagt. Hätte ich alles sagen wollen, so wäre aus der Physiklektion eine Astronomielektion geworden. Das Fehlende ist hier durch Punkte angedeutet. Ihnen werde ich es selbstverständlich nachliefern!

Als dann nach wenigen Jahren die Definition schon wieder geändert wurde, war ich nicht mehr Lehrer für Physik, sondern für Elektrotechnik. Es gehörte also nicht mehr zu meinen Pflichten, den zukünftigen Ingenieuren *diesen Satz* beizubringen, wonach die Sekunde durch eine spezielle Resonanz im Cäsimatom definiert wird:

«Eine Sekunde ist das 9'192'631'770-fache der Periodendauer der... den... Atomen des Nuklids ^{133}Cs *entsprechenden Strahlung.»* Auch hier ist einiges weggelassen worden; die vollständige Fassung werde ich Ihnen später vorstellen.

Bis 1956 stützte sich, gemäss dem ersten der obigen Zitate, die Zeiteinheit auf die Rotation der Erde, die sich astronomisch leicht verfolgen lässt. Auch anschliessend lag der Definition ein astrononisch beobachtbares Phänomen zugrunde, nämlich ein Umlauf der Erde um die Sonne. Seit 1967 beruht die Definition der Sekunde nicht mehr auf dem Umlauf eines Planeten um die Sonne, sondern auf dem Umlauf von Elektronen um den Atomkern. Massgebend – im wahren Sinn des Wortes! – ist also heute nicht mehr der Makrokosmos, sondern der Mikrokosmos.

Zeiteinheit, Zeitskala, Weltzeit

Die Sekunde ist im heute verwendeten Internationalen Massystem (SI) die Einheit der Zeit, neben dem Meter als Einheit der Länge, dem Kilogramm als Einheit der Masse und noch eingen weiteren Einheiten. Die *Zeiteinheit* ist also das verbindliche Ur-mass für alle Leute die sich mit Zeitmessungen befassen.

An dieser Stelle sei noch der Begriff *Zeitskala* erklärt. Zeitskalen dienen zum Festlegen von Zeitpunkten. Eine Zeitskala wird, ausgehend von einem durch Übereinkunft festgelegten «Nullpunkt», durch aneinandergereihte Zeiteinheiten gebildet, deren Dauer, das «Skalenmass», in der Regel durch Definition festgelegt ist, zum Beispiel also durch die Sekunde. Eine die MEZ zeigende Uhr verkörpert unsere gebräuchlichste Zeitskala.

Die für unser tägliches Leben massgebende Zeitskala lehnt sich an den Sonnenlauf an: Sonne im Osten – aufstehen; Sonne im Süden – Mittagessen – so ungefähr. Unter der

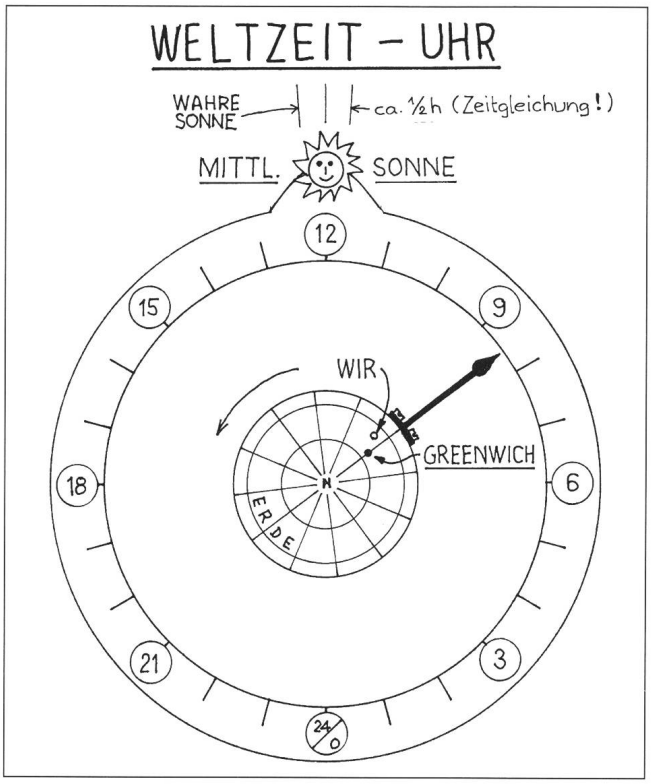


Bild 1

Weltzeit oder *Universal Time UT* wollen wir im folgenden die mittlere Sonnenzeit auf dem Nullmeridian verstehen (exakt müsste hier UT1 stehen. Da aber der Unterschied zwischen UT0 und UT1 im vorliegenden Zusammenhang unbedeutend ist, sei die Weltzeit hier einfach mit UT bezeichnet). Wenn die mittlere Sonne in Greenwich kulminiert, ist es also 12 Uhr Weltzeit. Man darf sich vorstellen, dass die rotierende Erde etwa gemäss Bild 1 einen langen Zeiger trägt, der auf einem an der mittleren Sonne befestigten Zifferblatt die Weltzeit angibt. Die Weltzeit verläuft also, mit anderen Worten, proportional zum Drehwinkel der Erde relativ zur mittleren Sonne.

Genügend konstant?

Als Dauer einer Sekunde galt bis 1956, es sei hier wiederholt, der 86400-ste Teil eines mittleren Sonnentages. Unter diesem ist das über längere Zeit gewonnene sogenannte «gleitende Mittel» der wahren Sonnentage zu verstehen.

---

* *Vortrag gehalten an der Luzerner Astrotagung vom 25. Oktober 1994*

Eine wichtige Bedingung, die jede Einheit erfüllen muss, ist ihre Konstanz; sie sollte sich also im Lauf der Zeit nicht verändern. Wir interessieren uns daher jetzt für die Frage, ob die Rotationsgeschwindigkeit der Erde genügend konstant ist, um als Zeiteinheit dienen zu können.

Im Jahr 1695 berichtete der engliche Astronom EDMOND HALLEY, dessen Name uns ja aus anderem Zusammenhang wohlbekannt ist, dass er Abweichungen der Mondbewegung gegenüber dem berechneten Verhalten festgestellt habe. «Rückwärtsberechnungen» bis in die Antike von Finsternissen, Konjunktionen und anderen auffälligen Erscheinungen zeigten ebenfalls Differenzen gegenüber zeitgenössischen Beobachtungen. Man kam zur Ansicht, das solche Abweichungen zumindest teilweise zu erklären sind, wenn man annimmt, dass die Erdrotation sich allmählich verlangsamt und dass dadurch die darauf gegründete Zeitskala gedehnt wird. In den Dreissigerjahren unseres Jahrhunderts wurde durch Vergleich von astronomischen Beobachtungen mit den Angaben der besten damals verfügbaren Uhren nachgewiesen, dass die Erdrotation auch in Abhängigkeit von den Jahreszeiten schwankt. Nach heutiger Ansicht wird die Drehgeschwindigkeit der Erde durch folgende Effekte beeinflusst:

- fortschreitende Verlangsamung, verursacht durch die Reibung der bei Flut und Ebbe bewegten Wassermassen (sog. «Gezeitenreibung»). Dadurch verlängert sich der mittlere Sonnentag um etwa 1,5 ms im Jahrhundert;
- jahreszeitliche Schwankungen, verursacht durch Veränderungen des Trägheitsmoments der Erde als Folge von Verlagerungen von Wasser- und Luftmassen. Dadurch ist beispielsweise der Tag im April um rund 1 ms länger als im August;
- unregelmässige, nicht vorhersehbare Schwankungen, verursacht durch Vorgänge im Erdinnern. Dadurch kann der Tag sowohl verlängert wie auch verkürzt werden.

Alle diese Unregelmässigkeiten sind so geringfügig, dass der durchschnittliche Erdbewohner während eines Menschenalters gewiss nichts davon bemerkt. Nun erschienen aber vor etwa 40 Jahren die sogenannten Atomuhren, und die liefen viel gleichmässiger als die Erde. Damit kündigte sich das Ende der Sonnenzeitsekunde als Zeiteinheit an. Viele meinten, man solle die von einer besonders geeigneten Atomuhr gelieferte Sekunde als neue Zeiteinheit definieren und darauf eine gleichmässig ablaufende Zeitskala gründen.

Die Sache wird umgedreht

Aber jetzt bekamen es die Astronomen mit der Angst zu tun! Sie besassen ja seit Jahrtausenden das Monopol, die Zeit vom Himmel abzulesen, und mussten nun befürchten, dass ein physikalischer Apparat ihnen dieses Monopol entreissen könnte. Daher forderten sie, auch eine neu zu definierende Zeiteinheit müsse sich auf astronomisch beobachtbare Phänomene stützen. Die Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union von 1952 erarbeitete in aller Eile die Definition einer neuen Zeiteinheit von konstanter Dauer als Mass für eine gleichmässig ablaufende Zeitskala. Grundlage dazu sollte nicht mehr die Erdrotation sein, sondern die ebenfalls astronomisch messbaren Bewegungen der Planeten oder des Mondes.

Die Idee sei anhand von Bild 2 erklärt. Es zeigt die geozentrisch gesehene ekliptikale Länge λ des Mondes in Abhängigkeit von der Zeit t. Dieser Zusammenhang ist schon vor Jahren vorausberechnet worden. Das Ergebnis einer solchen Berechnung nennen wir bekanntlich eine *Ephemeride;* dies ist das griechische Wort für «Tagebuch».

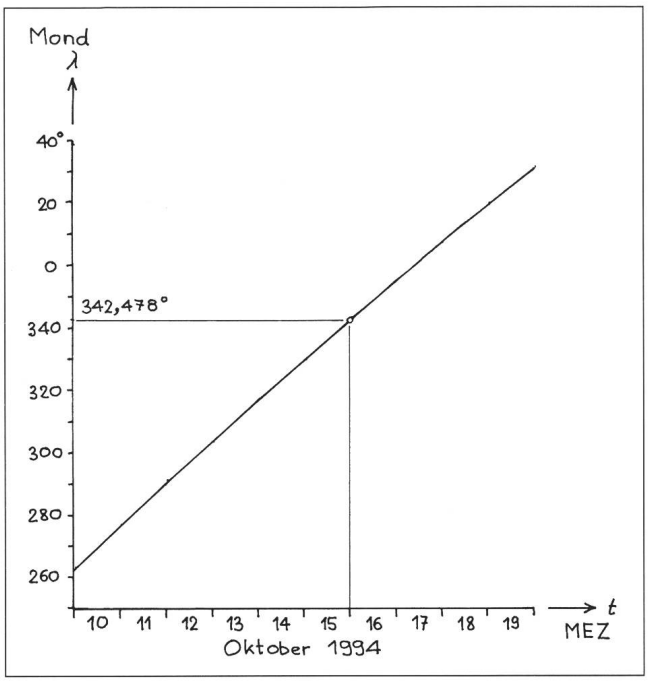


Bild 2

Ich habe einen Punkt der Kurve hervorgehoben: Für Mitternacht am 15. Oktober 1994 (dem Tag des Vortrags) ist die Länge des Mondes zu 342,478 Grad berechnet worden.

Bei solchen Ephemeriden setzen wir stillschweigend voraus, dass wir als unabhängige Variable eine gleichmässig ablaufende Zeit haben. Beim Vorausberechnen konnte man aber noch gar nicht wissen, wie sich die Erde während der Gültigkeit der berechneten Ephemeride verhalten würde! Es ist daher durchaus möglich, dass die genannte Mondlänge nicht genau um Mitternacht MEZ vorlag, sondern kurz vorher oder kurz nachher.

Die Astronomen drehten nun die Sache um. Sie sagten: *Wenn* wir sehen, dass die Länge des Mondes 342,478 Grad ist, *dann* ist es so-und-so spät. Natürlich wird dieser Zeitpunkt nicht auf der unsicheren MEZ-Skala abgelesen, sondern auf der neu zu definierenden, gleichmässig ablaufenden Skala, die *Ephemeridenzeit* genannt wird.

Für eine Skala braucht man, wie schon erwähnt, einen Nullpunkt und ein Skalenmass. Als Skalenmass der Ephemeridenzeit wurde die *Ephemeridensekunde* definiert. Sie erinnern sich an mein Geständnis, wonach ich seinerzeit meinen Studenten eine etwas verstümmelte Version dieser Definition vorgelegt habe. Hier sei nun die genaue Definition erklärt.

Dreisatz genügt

In Bild 3 sehen Sie wieder eine Ephemeride. Die Kurve P zeigt qualitativ die ekliptikale Länge L der mittleren Sonne in Abhängigkeit von einer gleichmässig verlaufenden Zeit t während des Jahres 1900. Die Geschwindigkeit der Sonne in ihrer Bahn ist nicht konstant; sie nimmt entsprechend der Steigung der Kurve mit der Zeit allmählich zu. Die Tangente G zeigt diese Steigung für den Jahresbeginn. Hätte sich die Sonne während des ganzen Jahres genau so schnell bewegt wie am Jahresbeginn, so würde für den Sonnenlauf also die Gerade G gelten.

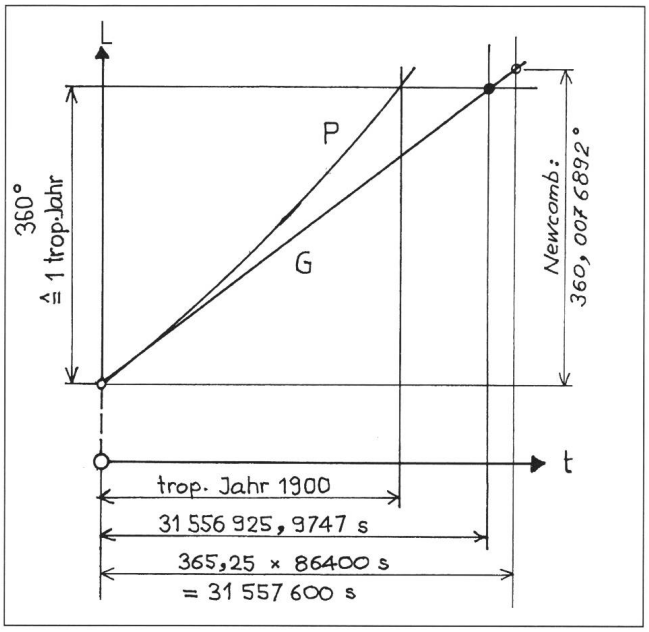


Bild 3

Diese Ephemeride wurde 1895 durch den berühmten amerikanischen Astronomen SIMON NEWCOMB angegeben. Als Zeiteinheit verwendete er das sogenannte Julianische Jahrhundert mit 36525 Tagen. Als «Ephemeridenjahr» definierte man nun ein Jahr mit 365,25 Tagen zu je 86400 Ephemeridensekunden, also mit 31'557'600 Ephemeridensekunden. Im Ephemeridenjahr 1900 hätte nach Newcomb die Sonne, wäre sie der Geraden G gefolgt, eine Kleinigkeit mehr als 360° zurückgelegt, nämlich 360,0076892°. Daraus lässt sich mit einem Dreisatz berechnen, dass für 360° eine Zeit von 31'556'925,9747 Ephemeridensekunden benötigt worden wäre.

Man könnte nun formulieren: Eine Ephemeridensekunde *wäre* der (rund) 31-millionste Teil des tropischen Jahres 1900, *wenn* sich die mittlere Sonne während des ganzen Jahres genau so schnell bewegt *hätte* wie im Zeitpunkt des Jahresanfangs. Ein Satz mit «wäre» und «hätte» eignet sich aber schlecht für eine seriöse Definition. Die genaue Definition lautet daher

«Die Sekunde ist der 31'556'925,9747-te Teil des tropischen Jahres für 1900, 0. Januar, 12 h Ephemeridenzeit.»

Das Wörtchen «für» soll heissen: «gültig im Zeitpunkt».

Der 0. Januar 1900 ist nichts anderes als der 31. Dezember 1899.

Die Ephemeridensekunde wurde 1956 als neue Zeiteinheit definiert. Sie ist um gut 1 Millionstel Prozent kürzer als die damalige Weltzeitsekunde.

Der Nullpunkt der Ephemeridenzeitskala wurde «in die Vergangenheit» gesetzt. 1958 akzeptierte die Internationale Astronomische Union folgende Definition:

«Die Ephemeridenzeit uird gezählt vom Zeitpunkt, nahe dem Beginn des KalenderJahres 1900, als die geometrische Länge der Sonne 279°41'48,04» war; dieser Zeitpunkt soll genau 1900, 0. Januar, 12 Uhr Ephemeridenzeit sein»

Ab 1960 wird in den grossen astronomischen Jahrbüchern die Ephemeridenzeitskala als unabhängige Variable benützt.

Beschränkte Lebensdauer

Der grosse Nachteil der Ephemeridenzeitskala besteht darin, dass sie nicht direkt an einer Uhr ablesbar ist. Im Prinzip musste man also den Zeitpunkt eines interessierenden Ereignisses anhand irgendeiner Uhr bestimmen und dann warten, bis ausgewertete astronomische Beobachtungen sagten, wie falsch die Uhr in jenem Moment gegangen war, welche Korrekturen also allenfalls anzubringen waren. Es konnte einige Monate oder gar einige Jahre dauern, bis die Beobachtungsresultate vorlagen.

Und wie steht's mit der Ephemeridensekunde? Definieren ist das eine, Realisieren ist das andere. Auf Grund der Definition kann man die Ephemeridensekunde nicht realisieren. Man kann sich ja nicht das Jahr 1900 in die Sternwarte oder ins Labor holen und es definitionsgemäss unterteilen!

Angesichts dieser Nachteile bediente man sich daher in der Praxis der sogenannten Atomuhren, nachdem 1955 in England das erste für Dauerbetrieb geeignete Exemplar in Betrieb gesetzt worden war. Auch die Astronomen taten das, und sie hatten dabei nicht einmal ein schlechtes Gewissen. 1964 wurden denn auch die Atomuhren international als Hilfsmittel zum Darstellen der Ephemeridenzeitskala anerkannt.

Es war von Anfang an zu erwarten, dass der Ephemeridensekunde nur ein kurzes Leben als physikalische Einheit beschieden sei. Schon 1956, im selben Jahr also, da die Definition der Ephemeridensekunde in Kraft trat, gründete nämlich das Internationale Komitee für Mass und Gewicht ein *Beratendes Komitee für die Definition der Sekunde,* das CCDS. In diesem Komitee vereinigten sich Astronomen und Physiker. Sie arbeiteten, so liest man in einem Bericht, «mit ständig wachsendem gegenseitigem Verständnis zusammen».

Ungewohnte Grösse

Seit Ende der 40er-Jahre sind in mehreren Ländern verschiedene Typen von sogenannten Atomuhren entwickelt worden. Es ging stets darum, eine Resonanzschwingung von Molekülen oder von Atomen auszunützen. Man versuchte es mit Ammoniak, mit Cäsium, mit Rubidium, mit Wasserstoff und in der Schweiz auch mit Thallium. Durchgesetzt hat sich das Cs-Frequenznormal. Das Spektrum des Cs-Atoms weist u.a. eine Linie bei einer Frequenz von etwa 9 GHz auf, das sind 9 Milliarden Perioden pro Sekunde. Sie ziehen wohl eine Angabe der Wellenlänge in Ångström-Einheiten vor, wie es in der Spektroskopie üblich ist: es sind deren rund 326 Millionen Å oder 33mm! Für einen Astrophysiker gewiss eine recht ungewohnte Grösse, aber doch im Prinzip nichts anderes als eine Spektrallinie im gewohnten Bereich. Mit der Frequenz von 9 GHz kamen die Elektroniker in den 50er-Jahren gut zurecht, denn Frequenzen dieser Grössenordnung waren ihnen von der Radartechnik her vertraut.

Ein Cs-Normal ist also ein Erzeuger von Schwingungen sehr stabiler Frequenz mit etwa 9 Milliarden Perioden pro Sekunde. Mit einfachen Mitteln der Elektronik kann man diese Frequenz durch eine beliebig wählbare Zahl teilen und so beispielsweise Impulse im Sekundentakt erhalten.

Es war nun die Frage zu klären, wieviele von diesen Perioden eine Atomzeitsekunde darstellen sollten, anders gefragt: wie lang eine Atomzeitsekunde sein sollte. Mit Rücksicht auf die Kontinuität wurde die Atomsekunde so genau wie möglich der Ephemeridensekunde angepasst. Diese «Eichung der Atomuhr» erfolgte von 1955 bis 1958 in Amerika und in England. Nachdem Mitte der 60er-Jahre relative Unsicherheiten der Frequenz von etwa 10^{-12} erreicht worden waren, konnte im Jahr 1967 die vom CCDS vorgeschlagene und noch heute gültige Definition der Sekunde in Kraft treten: *«Die Sekunde ist das 9'192'631'770fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaux des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.»*

Die Erweiterung gegenüber dem, was ich Ihnen am Anfang dieses Beitrags vorgestellt habe, betrifft eine an die Atomphysiker gerichtete Bezeichnung der benützten Spektrallinie.

Verglichen mit der Weltzeitsekunde von 1967 ist die Atomzeitsekunde um etwa 4 Millionstel Prozent kürzer.

Anders als mit der Ephemeridensekunde ist jetzt jedes besser eingerichtete Labor imstande, sich die Zeiteinheit direkt auf Grund der Definition zu beschaffen. Es kann hierzu eine eigene Atomuhr herstellen oder sich für eine fünfstellige Zahl von Franken ein handelsübliches Cs-Normal kaufen.

Wie bei der Ephemeridenzeitskala, so ist auch bei der Atomzeitskala der Nullpunkt «in die Vergangenheit» gelegt worden: am 1. Januar 1958 um 0 Uhr Weltzeit startete die *Internationale Atomzeitskala* IAT (oder TAI, je nachdem, ob die Abkürzung aus dem Englischen oder aus dem Französischen kommt). Auf die gegenseitige Lage aller besprochenen Zeitskalen werde ich am Schluss dieses Beitrages nochmals eingehen.

Von gesetzwidrigen Gummisekunden

Bevor wir betrachten, was man heute mit der Atomzeitsekunde macht, sei kurz beschrieben, was sich bei den «Konsumenten» abspielte.

Viele Leute möchten einfach die genaue Zeit wissen. Dazu können sie z.B. die Zeitzeichen abhören, die zu verschiedenen Tageszeiten von den Radiosendern ausgestrahlt werden. Die vom Schweizer Radio ausgesendeten Zeitzeichen werden, wie schon seit vielen Jahrzehnten, im Observatorium Neuenburg erzeugt und per Telefonleitung den Studios zugeführt, die sie dann in ihre Sendungen einfügen.

Andere Leute sind am genauen Messen von Frequenzen interessiert. Unter der Frequenz einer Schwingung verstehen wir bekanntlich die Anzahl Perioden, die in einer Sekunde ablaufen; die Frequenzmessung ist also eng mit der Zeitmessung verknüpft. Zu den an der Frequenzmessung interessierten Leuten gehören in erster Linie die Hochfrequenzingenieure, die in der Radio- und Fernsehtechnik, in der Radartechnik und in der Raumfahrt arbeiten.

In den 60er-Jahren gab es mehrere Sender, die keine Radioprogramme ausstrahlten, sondern nur Zeitsignale und sogenannte Normalfrequenzen, die den Ingenieuren zum Kalibrieren ihrer eigenen Geräte dienten. Mit einigen von diesen Sendern machte man es damals wie folgt: Man schätzte jeweils ab, wie sich die Erde im bevorstehenden Jahr etwa verhalten würde, und passte sowohl die Normalfrequenz wie auch die aus ihr abgeleiteten Sekundenmarken der Erddrehung und damit dem mittleren Sonnentag an. Die «Normalfrequenz» lief also von Jahr zu Jahr langsamer, und mit ihr wich die «Sekunde» von Jahr zu Jahr mehr vom definierten Wert ab. Es war also so, wie wenn man einem Schreiner oder einer Schneiderin jedes Jahr einen etwas veränderten Massstab aushändigen würde, mit dem sie ihre Produkte zu messen hätten. Verhielt sich die Erde dann doch nicht genau so wie geschätzt, so fügte man einzelne «Sekunden» ein, die 1,1 s oder auch 0,9 s lang waren, je nachdem.

Die jährlich vorzunehmenden Änderungen waren zwar für gewöhnliche Begriffe sehr klein, in der Regel weniger als ein Millionstel Prozent. Für die Ingenieure waren die bei jeder Präzisionsmessung vorzunehmenden Korrekturen aber äusserst störend. Leute, die bei ihrer Arbeit keine extrem hohe Genauigkeit benötigten, nahmen die Signale so wie sie kamen; für ihre Bedürfnisse waren sie auch ohne Korrektur genügend genau. Das führte dazu, dass mit der Zeit kaum noch jemand wusste, was da eigentlich gesendet wurde, ob es auf der «gesetzlichen Sekunde» gemäss der jeweils gültigen Definiton beruhte oder ob es etwas war, das irgendwie der veränderlichen mittleren Sonnenzeit angepasst wurde. Der Ruf nach Klarheit war daher nicht mehr zu überhören. Nach dem Gesagten ist es verständlich, dass sich jetzt nicht mehr nur die Astronomen und die Physiker, sondern auch die für Radiokommunikation zuständigen Organisationen an den Diskussionen beteiligten.

Gesucht: ein Hut für zwei Wünsche

Wenden wir uns nun der heutigen Situation zu! Seit dem 1. Januar 1958 läuft also die Atomzeituhr unbeirrbar und unabhängig vom Verhalten der Erde. Bei ihrem Start stimmte sie mit der Weltzeit überein; heute, nach rund 37 Jahren, geht sie gegenüber der Weltzeit schon um fast eine halbe Minute vor.

Würden wir unsere Uhren nach dieser Atomzeitskala laufen lassen, so müsste dies also ganz allmählich dazu führen, dass sie schon bei Sonnenaufgang 12 Uhr zeigen. Es war daher nach einem System zu suchen, das die unbestreitbaren Vorteile der Atomzeit mit dem Wunsch vereinigte, die Uhren, nach denen wir unser Tagwerk einteilen, wenigstens angenähert in Gleichschritt mit dem täglichen Lauf der Sonne zu halten (was im folgenden zur Weltzeit gesagt wird, lässt sich sinngemäss auf die zur Weltzeit «parallel» laufenden Zonenzeiten übertragen, für uns also auf die Mitteleuropäische Zeit).

Diese Aufgabe ist zum Beispiel so lösbar, dass wir unsere Uhr im Atomsekundentakt ticken lassen und sie immer dann, wenn sie der Weltzeit um 0,5 s vorgeht, für die Dauer einer Sekunde anhalten. Nach dem Neustart geht dann die Uhr gegenüber der Weltzeit um eine halbe Sekunde nach; ihre Anzeige wird sich also nie um mehr als diesen Betrag von der Weltzeit unterscheiden. Es müsste ein Institut existieren, das dauernd die Atomzeit mit der durch astronomische Beobachtungen gewonnenen Weltzeit vergleicht und alle Interessenten informiert, wenn es wieder so weit ist, dass sie ihre Uhren kurz anhalten müssen.

Nach diesem Prinzip wird, wenn auch mit einigen Modifikationen, seit dem 1. Januar 1972 verfahren. Das zuständige Institut war bis Ende 1987 das Bureau International de l'Heure in Paris. Dieses Büro hat sehr gut gearbeitet, aber einigen Leuten gefiel es nicht, dass es sozusagen ein Verein war, ohne Absicherung durch zwischenstaatliche Verträge. Daher wurde der *International Earth-Rotation Service* IERS gegründet und dem Internationalen Büro für Mass und Gewicht angeschlossen. Seit Anfang 1988 «befiehlt» also der IERS das Anhalten der Uhren.

Es ist vielleicht interessant, an dieser Stelle kurz die Mittel zu erwähnen, mit denen heute die Rotationsgeschwindigkeit der Erde gemessen und die Weltzeit ermittelt wird. Früher bestimmte man mittels Passageinstrument oder Meridiankreis die Sternzeit und berechnete daraus die Weltzeit. Später geschah dasselbe mit Hilfe des fotografischen Zenitteleskops. Heute verwendet man zum Beispiel Laser-Entfernungsmessungen zum Mond und zu künstlichen Erdsatelliten. Ausserdem bedient man sich der Radiointerferometrie auf sehr langer Basis. Als Bezugssystem dienen dabei weit entfernte und daher als raumfest betrachtete Radioquellen, insbesondere Quasare. So kann die Länge jedes einzelnen Tages mit einer Unsicherheit von weniger als 30 µs bestimmt werden. In einem Institut in München experimentiert man mit Ringlaserkreiseln; man hofft, die Drehgeschwindigkeit der Erde absolut, d.h. ohne Bezug auf ein äusseres System messen zu können.

Anhalten und schalten

Das von Zeit zu Zeit nötige Anhalten der Uhren geschieht nun nicht genau dann, wenn die Differenz zwischen Uhr- und Weltzeit 0,5 s erreicht, sondern es findet eine Korrektur, wenn überhaupt nötig, nur Ende Dezember oder Ende Juni statt. Dies bedeutet natürlich, dass die Differenz auch grösser werden kann als 0,5 s. In «Notfällen», wenn sie 0,9 s zu überschreiten droht, kann auch am Ende irgendeines anderen Monats eine Korrektur angeordnet werden.

Die Korrektur besteht darin, dass die letzte Minute des betreffenden Monats 61 Sekunden zählt; es wird also eine sogenannte *Schaltsekunde* eingefügt. Für uns Mitteleuropäer geschieht dies um 1 Uhr MEZ in der Nacht auf den 1. Januar oder um 2 Uhr MESZ in der Nacht auf den 1. Juli. Alle Leute, die aus irgendwelchen Gründen (vielleicht auch nur als Hobby) an sekundengenauer Zeitangabe interessiert sind, halten dann (oder auch erst am folgenden Morgen) ihre Uhren für die Dauer einer Sekunde an oder korrigieren den Zeigerstand. Das bevorstehende Einfügen einer Schaltsekunde erfährt das Publikum aus der Tagespresse, die Fachwelt aus den Bulletins der mit der Zeitverteilung betrauten Institute oder aus besonderen Signalen der Zeitzeichensender.

Es gab Leute, die taten sich mit den Schaltsekunden etwas schwer. Es war ihnen unsympathisch, dass eine so vertraute Zeiteinheit wie die Minute nicht immer gleich lang sein sollte. Mit den Schaltjahren, die um einen Schalttag länger sind als die gewöhnlichen Jahre, hatten sie aber offenbar keine Probleme. Vielleicht ist es nützlich, sich klarzumachen, dass Schalttage und Schaltsekunden auf zwei verschiedenen Ebenen dieselbe Funktion erfüllen:

- Die *Schalttage* halten den *Kalender* im Gleichschritt mit den durch den *Erdumlauf um die Sonne* bedingten *Jahreszeiten,*
- Die *Schaltsekunden* halten die *Uhren* im Gleichschritt mit den durch die *Rotation der Erde um ihre Achse* bedingten *Tageszeiten.*

Die beschriebene, aus Atomsekunden aufgebaute und mit Schaltsekunden ergänzte Zeitskala heisst *Koordinierte Weltzeit UTC.* Die Einzelheiten dieses neuen Zeisystems wurden übrigens weder von einem astronomischen noch von einem physikalischen Gremium festgelegt, sondern vom CCIR, dem Internationalen Komitee für Radiokommunikation, anno 1971 in Genf. Die UTC wird, zusammen mit den jetzt glücklicherweise konstant bleibenden Normalfrequenzen, durch mehrere Zeitzeichensender verbreitet. Von diesen leben z.B. die sogenannten Funkuhren, deren Spektrum heute von der Armbanduhr bis zur Kirchturmuhr reicht. Einen solchen Sender gibt es auch in der Schweiz; er steht in Prangins am Genfersee und führt die Bezeichnung HBG. Seine Signale werden von einem an Ort und Stelle befindlichen Cs-Normal gesteuert; die Emission wird ständig vom Observatorium Neuenburg überwacht.

Wir sind nun in der Geschichte der Zeiteinheit beim «heute» angelangt, und damit ist der Hauptteil meines Beitrags fertig. Ich möchte jetzt noch kurz zeigen, wie sich die Erde in den letzten Jahrzehnten verhalten hat.

Blick zurück

Bis 1956 war ja die rotierende Erde der Zeitgeber. Heute verfügen wir über eine erdunabhängige Zeitskala. Wir können nun die Erde als Untersuchungsobjekt betrachten und wollen sehen, wie sich ihre Rotationsgeschwindigkeit seit 1958 relativ zu dieser Skala verändert hat.

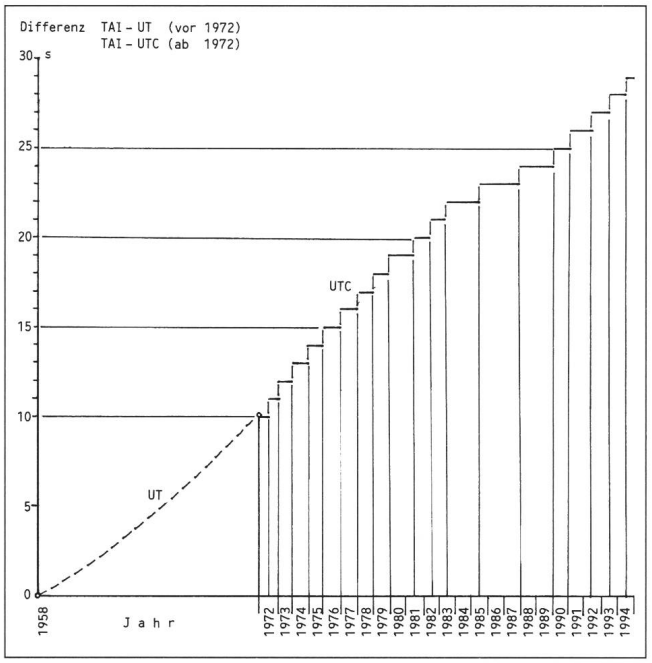


Bild 4

Bild 4 zeigt das Verhalten der Erde seit dem Start der Atomzeitskala im Jahr 1958. Gut erkennbar ist der stets ansteigende Rückstand der Weltzeit UT bzw. UTC gegenüber der Atomzeit TAI. Beim Start der Koordinierten Weltzeit UTC anno 1972 betrug dieser Rückstand etwa 10 Sekunden. Ab 1972 zeigt sich der durch die Schaltsekunden bewirkte treppenförmige Verlauf der UTC. Den ungefähren Verlauf der Weltzeit UT kann man verfolgen, wenn man eine glatte Kurve durch die Treppe legt. Je steiler diese Kurve verläuft, umso schneller wächst der Rückstand an, umso langsamer dreht sich also die Erde. Man sieht, dass der Rückstand nicht gleichmässig zugenommen hat; etwa zwischen 1970 und 1980 drehte sich die Erde langsamer als vorher und nachher. Die erwähnte glatte Kurve könne Sie selber in die Zukunft weiterführen, wenn Sie sich die Daten der zukünftigen Schaltsekunden notieren.

An dieser Stelle sei ergänzt, dass auch ein Gleichlauf der Erde mit der Atomzeit oder sogar ein Vorgehen in der Zukunft nicht auszuschliessen ist. Im letzteren Fall, wenn also die Weltzeittage kürzer wären als der Atomzeittag, würden «negative Schaltsekunden» eingefügt; die letzte Minute der betreffenden Monate würde dann nur 59 Sekunden zählen und die Treppe im Bild 4 würde abwärts führen.

Details erwünscht

In einem früheren Kapitel sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Erdrotation erwähnt worden. Zum Darstellen dieser Effekte ist die Treppe aus Bild 4 viel zu grob. Um den Verlauf der UT innerhalb eines Jahres zu zeigen, braucht man feinere und für entsprechend kürzere Zeitabstände gültige Angaben über die Differenz zwischen UT und UTC.

Solche Angaben sind verfügbar! Es gibt nämlich Leute, welche die Weltzeit auf Bruchteile von Sekunden genau kennen möchten. Dieses Bedürfnis besteht z.B. in den Kreisen, die sich mit der Bahnverfolgung von Satelliten und Raumsonden befassen. Für solche Interessenten liefert ein vom IERS

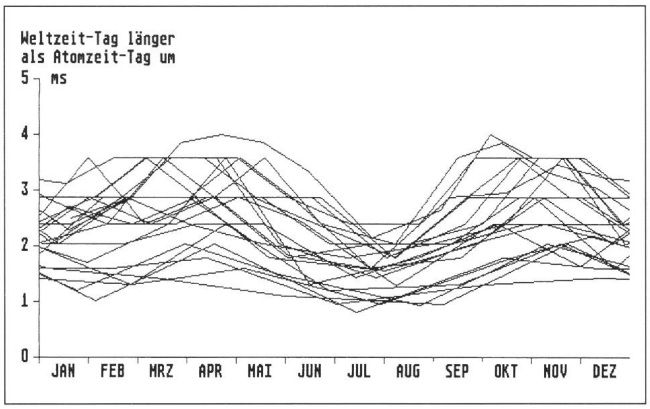


Bild 5

betriebener Schnelldienst Voraussagen darüber, um wieviel die Weltzeit in den bevorstehenden Wochen vermutlich von der UTC abweichen wird. Hierzu wertet der Schnelldienst laufend astronomische Beobachtungen zahlreicher Stationen aus und publiziert periodisch die auf Zehntelsekunden gerundete voraussichtliche Differenz DUT=UT-UTC. Interessenten erhalten also die Weltzeit mit einer Toleranz von weniger als 100 ms, indem sie die jeweils gültige DUT vorzeichenrichtig zur UTC addieren.

Aus diesen DUT-Angaben lässt sich nun das Verhalten der Erdrotation rekonstruieren. Je näher nämlich zwei solche Zehntelsekundensprünge zeitlich aufeinander folgen, umso langsamer hat sich die Erde in der Zwischenzeit gedreht. Bild 5 zeigt die aus solchen Zeitintervallen berechneten Überschüsse der Weltzeittage gegenüber den Atomzeittagen zu je 86400 Atomzeitsekunden. Die Ergebnisse aus den vergangenen rund 23 Kalenderjahren seit der Einführung von UTC und DUT sind hier übereinandergelegt worden.

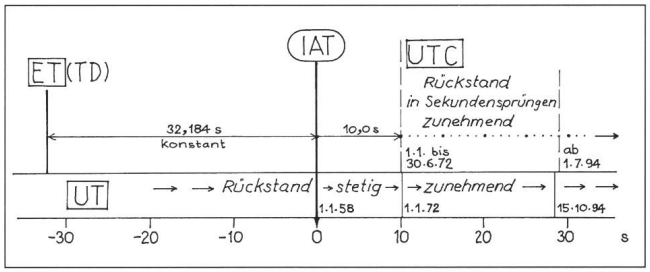
Auf dem Bild sehen Sie zweierlei: Sie erkennen einerseits das Systematische – die Tage sind im Frühjahr und im Herbst länger als im Sommer – und anderseits das Ausmass der innerhalb des betrachteten Zeitraumes vorgekommenen Streuungen.

Nochmals die Zeitskalen

Nun ist noch ein Versprechen einzulösen: Bild 6 zeigt zusammenfassend noch einmal die gegenseitige Lage der besprochenen Zeitskalen.

Wir beziehen alles auf die heute grundlegende Internationale Atomzeit IAT. Beim Start dieser Skala zu Beginn des Jahres 1958 wurde IAT der Weltzeit UT gleichgesetzt. Seither bleibt UT ständig weiter hinter IAT zurück. Am heutigen Tag (15. Oktober 1994) ist der Rückstand 28,4 Sekunden. Beim Start der koordinierten Weltzeit UTC am 1.1.1972 war UT um 10,1 s

Bild 6



verspätet gegenüber IAT. Da die koordinierte Weltzeit UTC, die im Takt mit der IAT tickt, auf wenige Zehntelsekunden gleich UT sein soll, startete sie mit 10,0 Sekunden Rückstand auf IAT.

Seit 1972 hat UTC mit UT eine Art «Böckligumpen» gespielt: Die im Bild stetig nach rechts laufende UT ist schaltsekundenweise von der UTC überholt worden. Bis heute haben 19 Schaltsekunden der UTC einen Rückstand von 29,8 s gegenüber der IAT verschafft.

Sie sehen links im Bild noch die Ephemeridenzeit ET. Beim rückwirkend erklärten Start anno 1900 war ET nahezu gleich UT. Da die Atomsekunde gleich lang ist wie die Ephemeridensekunde, laufen die Skalen ET und IAT «parallel» zueinander mit der konstanten Differenz von 32,184 s. Die Atomzeit ist daher ein bequemes Mass für die Ephemeridenzeit, die noch stets in den grossen astronomischen Jahrbüchern als unabhängige Variable dient, aber seit 1984 «dynamische Zeit» (TD oder DT) heisst.

Die Weltzeit hat also in rund 95 Jahren gut eine Minute gegenüber der gleichmässig ablaufenden Ephemeridenzeit verloren, allerdings unregelmässig, mal schneller, mal langsamer; in den 30er-Jahren gab es einen Stillstand und sogar einen ganz leichten Vorlauf.

Und in Zukunft?

Nachdem wir uns bisher mit dem Verhalten der Erdrotation in der Vergangenheit und in der Gegenwart beschäftigt haben, seien die letzten Zeilen und das letzte Bild dieses Beitrages noch einem Blick in die Zukunft gewidmet.

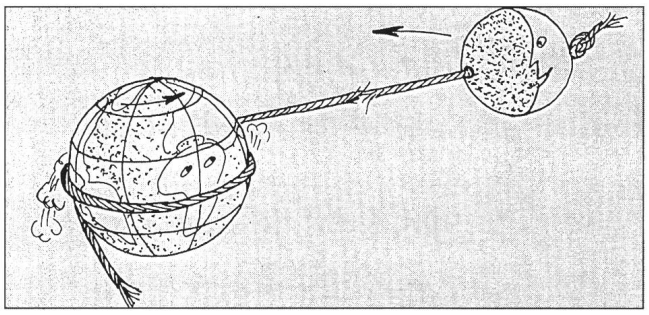


Bild 7

Das Abbremsen der Erde durch die Gezeiten, die hauptsächlich durch den Mond verursacht werden, wird andauern. Bitte verstehen das Bild 7 nicht falsch: das Seil wird nicht um die Erde aufgewickelt, sondern die Erddrehung wird durch Reibung in der Seilschlinge gebremst. Als Reaktion wird natürlich die Bahngeschwindigkeit des Mondes vergrössert. Nun wissen Sie: Wenn die Geschwindigkeit eines Erdsatelliten vergrössert wird, entfernt er sich weiter von der Erde. Vorausgesetzt, dass das Planetensystem überhaupt genügend lang existiert, wird der Endzustand des gezeichneten Systems so aussehen: Erde und Mond werden einen Umlauf in der gleichen Zeit ausführen; Tag und Monat werden also gleich lang sein und die Erde wird dem Mond immer dieselbe Seite zuwenden. Die Entfernung des Mondes wird etwa 60% grösser sein, als sie heute ist. Mit recht einfachen Überlegungen kann jeder Physikstudent berechnen, dass ein Umlauf für die beiden etwa 50 heutige Tage dauern wird.

Damit ist der Kreis geschlossen: ein Physikstudent stand ja schon ganz am Anfang unserer Betrachtungen.

DR. PAUL WIRZ
Sälistrasse 20, 6005 Luzern

Extrem gute Durchsicht
Stärkere Weitsicht
Hochkorrigierte Klarsicht

Abbe-Okulare von Carl Zeiss

Wir haben mit unseren apochromatischen APQ-Objektiven neue Maßstäbe gesetzt. Der Erfolg: über 97 % Transmission und gestochen scharfe Bilder.
Nunmehr gibt es auch das passende optische Gegenstück: ein Okular, das die Qualitäten der Objektive voll nutzt.

Natürlich haben wir gleich eine komplette Reihe entwickelt: Die Abbe-Okulare - MC-vergütete Vierlinser mit Lanthangläsern - erhältlich mit 4, 6, 10, 16 und 25 mm Brennweite und 1¼"-Steckdurchmesser.
Ab 16 mm auch mit Schiebehülse für die optimale Anpassung für Brillenträger.

ZEISS

Carl Zeiss AG
Grubenstraße 54
Postfach
8021 Zürich
Tel 01/465 91 91

Av. Juste-Olivier 25
1006 Lausanne
Tel 021/320 62 84