Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 31 (1973)
Heft: 136

Artikel: Die Rotation der Erde und unsere Uhrzeit
Autor: Müller, Helmut
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899701

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: 17.07.2025

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

ORION

Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

31. Jahrgang, Seiten 77–105, Nr. 136, Juni 1973 31e année, pages 77–105, No. 136, Juin 1973

Die Rotation der Erde und unsere Uhrzeit

von Helmut Müller, Zürich

Es hat sich kürzlich zweimal ereignet, am 1. Juli 1972 und am 1. Januar 1973, dass unsere Uhrzeit, wie wir sie laufend aus dem Telephonzeitzeichen oder einmal täglich um 12 Uhr 30 aus dem Radiozeitzeichen entnehmen können, um eine volle Sekunde geändert wurde: In der Nacht wurde eine Sekunde zweimal gezählt. Das erste Mal ging dieses Ereignis durch alle Zeitungen und erregte direkt Aufsehen, das zweite Mal hatte man es schon weniger beachtet. Eine Sekunde ist nicht viel und ist für den Ablauf unseres täglichen Lebens bedeutungslos. Bei der grossen Genauigkeit der modernen Uhren scheint es aber doch ganz angebracht zu sein, sich klar zu machen, warum es zu dieser Änderung der Uhrzeit gekommen ist, warum es gerade jetzt so auffällig zu Tage tritt. Manche beunruhigte dies fast als ein böses Omen unserer auch sonst in's Wanken geratenen Zeit. Dem ist aber nicht so, es gab schon immer Zeitsprünge bei unserer Uhr, wenn man diese auf einen absolut gleichmässig laufenden Chronometer bezog, nur waren die Sprünge bisher kleiner und darum unauffälliger, weil man die Uhr, welche die Zeitzeichen steuert, in ihrem Gang ständig so regulierte, dass sie der Erduhr möglichst gut angepasst war. Es lohnt sich vielleicht, einmal diese etwas komplizierten Zusammenhänge zwischen der Erduhr und unserer Uhrzeit ein wenig genauer zu betrachten.

Massgebend für unser tägliches Leben ist die Erduhr, das ist die Winkel-Position der rotierenden Erde in bezug auf die Gestirne, speziell in bezug auf die Sonne. Demgemäss wollen wir eine Uhrzeit haben, nach der es 12 Uhr mittags ist, wenn die Sonne im Süden kulminiert, und dieser Zustand soll sich nicht merklich und vor allem nicht systematisch ändern. Wir wissen schon, dass man hier, wenn man eine gleichmässige und für ein gewisses Gebiet auf der Erde gleiche Uhrzeit bekommen will, einige Konzessionen machen muss (vgl. ORION 29, 171; 1971), weil sich die Sonne nicht mit gleichmässiger Geschwindigkeit am Himmel und sich auch nicht auf dem Himmelsäquator bewegt, und weil wir nicht lokale Ortszeiten, sondern Zonenzeiten benutzen, die für einen grösseren Bereich gelten. So steht die Sonne in der Schweiz im Durchschnitt keineswegs um 12 Uhr Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) im Süden, sondern z. B. in Bern erst etwa eine halbe Stunde später, ganz im Osten der Schweiz etwa 18 Minuten nach 12, ganz im Westen etwa 36 Minuten nach 12. Wegen der Zeitgleichung, dem Unterschied zwischen der wahren Sonne und der fiktiven, konstruierten mittleren Sonne, können sich diese Unterschiede noch nach beiden Seiten hin um eine Viertelstunde verschieben. Diese Abweichungen unserer Uhrzeit von der wahren Sonnenzeit kennen wir aber sehr genau und können sie exakt angeben. Wenn man sehr hohe Genauigkeit beansprucht, ist es aber ein ernsthafter Nachteil, dass die Rotation der Erde nicht gleichmässig erfolgt, weshalb die Erduhrzeit nicht so gleichmässig ist wie die Zeit einer Atomuhr. Wir kennen folgende Eigenarten unserer Erduhr: Die Erde dreht sich stetig langsamer, die Rotationsdauer lässt ausserdem eine jahreszeitliche Periode erkennen, die Rotationsdauer variiert sodann noch unregelmässig, sie ist über längere Zeiträume hin kürzer, dann wieder länger, wechselnd und verschieden lang anhaltend; schliesslich verlagert sich noch die Rotationsachse im Erdkörper mehr oder weniger periodisch um eine Mittellage, wobei auch noch eine säkulare langsame Verschiebung vorhanden zu sein scheint.

Wir wollen die einzelnen Effekte einmal gesondert betrachten und gleich mit dem zuletzt erwähnten beginnen. Wenn die Rotationsachse der Erde mit einer ihrer Hauptträgheitsachsen zusammenfiele, würde die Erde, vom Einfluss äusserer Kräfte abgesehen, mit konstanter Geschwindigkeit rotieren, und in sehr frühen Zeiten war das sicher einmal der Fall. Durch Massenverlagerungen im Innern der Erde hat sich dies geändert, und daraus folgt, wie man nach den Gesetzen der Mechanik zeigen kann, dass sich nun die Rotationsachse, die ja keine markierte Gerade ist, im Erdkörper verlagert. Die Rotationsachse beschreibt einen Kegel um die Trägheitsachse, oder ganz exakt ausgedrückt: Es rollen zwei Kegelflächen ohne zu gleiten aufeinander ab, der eine Kegel hat als Achse die Hauptträgheitsachse und einen Öffnungswinkel von etwa 0.6″, der andere die Richtung des Gesamtdrehimpulsvektors der Erde, der nach dem Satz von der Erhaltung des Gesamtdrehimpulses ohne Einwirkung äusserer Kräfte eine konstante Lage im Raum beibehält, mit einem sehr kleinen Öffnungswinkel von etwa 0.002″, und die jeweilige Berührungsgerade beider Kegel ist die instantane Rota-

tionsachse der Erde. Wegen der Kleinheit des Öffnungswinkels des zweiten Kegels bedeutet dies, dass die Rotationsachse im Raum praktisch eine feste Lage beibehält; von der Präzession und Nutation, die auf Einflüssen äusserer Kräfte beruhen und die wir kennen und berechnen können, wollen wir jetzt absehen, es taumelt hingegen sozusagen der Erdkörper um diese feste Rotationsachse. Praktisch wirkt sich das so aus, dass die Durchstosspunkte der instantanen Rotationsachse durch die Erdoberfläche, das sind Nordpol und Südpol der Erde, nicht immer an der gleichen Stelle liegen, sondern um eine mittlere Lage herumwandern. Für die Periode dieser Bewegung ergibt sich unter der Voraussetzung einer völlig starren Erde die EULERsche Periode von 304 Tagen, bei Annahme eines elastischen Erdkörpers, wie es zweifellos der Fall ist, die CHANDLERsche Periode von etwa 430 Tagen. In Wirklichkeit überlagert sich der CHANDLERschen Periode noch eine jährliche, bedingt durch jahreszeitlich verursachte Massentransporte wie Laubfall, Schnee, Eis usw.; auch ist eine langsame, mehr oder weniger regelmässige Verschiebung des mittleren Pols in Richtung des Meridians von etwa 65–75° westlicher Länge von vielleicht 0.2″ in 65 Jahren zu konstatieren, wobei zur Zeit noch schwer zu entscheiden ist, wieviel davon der globalen Plattentektonik, der Verschiebung grosser Blöcke, zuzuschreiben ist. Übrigens auch die Längen der beiden Perioden und die Amplituden der Polschwankungen werden keineswegs streng eingehalten, da in beiden Fällen viele verschiedene Effekte, deren Einflüsse man schwer abschätzen kann und die man nicht einmal alle kennt, im Spiele sind. Darum kann auch die genaue Lage des instantanen Pols immer erst nachträglich aus den Beobachtungen gewonnen, sonst nur sehr genähert extrapoliert werden.

Eine Verschiebung des Erdkörpers gegen die im Raum feste Rotationsachse bedeutet, dass der Zenit, der Durchstosspunkt der lokalen Lotlinie mit der Himmelssphäre, sich verlagert und damit auch der durch Himmelspol und Zenit definierte Ortsmeridian. Es ändert sich also der Abstand Pol-Zenit und wir messen demnach Polhöhen oder geographische Breiten, was dasselbe ist, die mit der CHANDLERschen Periode und der jährlichen Periode variieren, und wir messen ebenso variierende Durchgangszeiten durch den momentanen Meridian, also variierende geographische Längen. Beide Effekte kann man umgekehrt dazu benutzen, um die Koordinaten x, y des instantanen Erdpols bezogen auf eine feste Mittellage, den konventionellen internationalen Ursprung (Conventional International Origin = CIO), der der mittleren Lage des Pols in den Jahren 1900 bis 1905 entspricht, zu bestimmen. Praktisch sind dafür besonders Breitenbeobachtungen auf einer Reihe von Stationen geeignet, die sich alle nahezu auf der gleichen geographischen Breite, aber in verschiedenen geographischen Längen befinden. Man wählte dafür fünf Stationen auf der Breite + 39° 08′, auf denen ständig Breitenbeobachtungen nach der HORREBOW-TALCOTT-Methode mit den gleichen Sternen durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden laufend vom internationalen Breitendienst (International Polar Motion Service = IPMS) bearbeitet und publiziert. Für unser Zeitproblem ist wichtig, dass wir dann damit die aus der Beobachtung von Sterndurchgängen durch unsern momentanen lokalen Meridian gewonnene Zeit, die Zeit unserer «lokalen Erduhr» UTO (Weltzeit = Universal Time = UT), auf die Zeit UT1 reduzieren können, das ist die Winkelposition der Erde um ihre Rotationsachse, also die wirkliche Zeit unserer Erduhr. UT1 wäre im Gegensatz zu UT0 eine gleichmässige Zeit, wenn nicht noch die andern vorher erwähnten Unregelmässigkeiten vorhanden wären.

Die nächste dieser Unregelmässigkeiten, die jährliche Periode in der Rotationsdauer der Erde, hat man in den Jahren 1934 bis 1937 durch Vergleich der Erduhrzeit mit den damals neu erfundenen genausten Chronometern, den Quarzuhren, entdeckt. Als ihre Ursache kann man jahreszeitlich bedingte meteorologische Vorgänge annehmen, Luftmassenverlagerungen, Abschmelzen der Polkappen und dgl. Die Erde rotiert im Winter der an Festländern reicheren Nordhalbkugel langsamer, im Sommer schneller, wobei sich noch eine jährliche und eine halbjährliche Periode überlagern. Die Abweichungen der Tageslänge vom Mittelwert erreichen zwei fast gleich hohe positive Maxima von $+ 0.0004^s$ im November und Anfang April, die von einem schwachen Minimum von $+ 0.0001^s$ im Januar getrennt sind, während das Hauptminimum von $- 0.0008^s$ Ende Juli eintritt. Durch Aufsummieren dieser Effekte kommt es zu einer maximalen Korrektur von $+ 0.030^s$ Ende Mai und von $- 0.029^s$ Anfang Oktober, die Erduhr geht Ende Mai am meisten nach, Anfang Oktober am meisten vor. Die genannten Daten sind mittlere Werte, die von Jahr zu Jahr etwas variieren, wie nach der Ursache dieses Effektes auch durchaus zu erwarten ist. Korrigiert man die Weltzeit UT1 wegen dieser jahreszeitlichen Änderung der Rotationsdauer, so erhält man UT2, die momentan gleichmässige Weltzeit, die der augenblicklichen mittleren Rotationsdauer am besten angepasst ist.

Dass diese mittlere Rotationsdauer der Erde aber nicht konstant ist, sondern stetig zunimmt, unser Tag also allmählich immer länger wird, hat man aus der Beobachtung von weit zurückliegenden astronomischen Ereignissen schliessen können, wie vor allem von Sonnen- und Mondfinsternissen, von Konjunktionen von Planeten oder Sternen mit dem Mond und von Bedeckungen dieser Objekte durch den Mond, von Konjunktionen von Planeten mit Sternen, von Merkurdurchgängen vor der Sonnenscheibe; letztere konnten allerdings erst nach Erfindung des Fernrohrs beobachtet werden. Dass Finsternisse in vergangenen Zeiten zu andern Tageszeiten stattgefunden haben, als es die Berechnungen mit den aus den zeitgenössischen Beobachtungen gewonnenen Bahnelementen

von Sonne und Mond ergaben, hat schon HALLEY 1693 entdeckt und dabei festgestellt, dass diese Diskrepanzen um so grösser wurden, je weiter zurück die Ereignisse lagen, über die berichtet wurde. Er schloss daraus, dass der Mond im Laufe der Zeit seine Bewegung beschleunigt hat. KANT erklärte 1754, dass die Gezeiten, also Ebbe und Flut, durch Reibung die Erdrotation allmählich abbremsen müssen, und TOBIAS MAYER wies alsbald darauf hin, dass auf diese Weise HALLEYS Beobachtungsbefund ohne weiteres zu verstehen sei. Als jedoch LAPLACE einwandte, dass man eine Verlangsamung der Erdrotation auch an den Bewegungen der Planeten erkennen müsse, wovon damals nichts zu bemerken war, und sodann 1787 zeigte, dass die säkulare Verkleinerung der Exzentrizität der Erdbahn eine säkulare Beschleunigung der Mondbewegung von gerade der von HALLEY geforderten Grösse nach sich zieht, hielt man das Problem für gelöst und beschäftigte sich nicht weiter damit. Das Interesse erwachte erst wieder, als ADAMS 1853 nachwies, dass die Näherungsrechnungen von LAPLACE einen etwa zweimal grösseren Betrag der Beschleunigung ergeben hatten als seine eigenen exakten Berechnungen, so dass also doch noch eine merkliche säkulare Beschleunigung der Mondbewegung unerklärt blieb.

An und für sich sollte der Mond als der uns nächste Himmelskörper mit der grössten täglichen Bewegung am Himmel von rund 13° (bei der Sonne beträgt diese nur 1°) Unregelmässigkeiten der Erdrotation am deutlichsten wiederspiegeln, er ist aber für die Bestimmung der säkularen Verlangsamung der Erdrotation deshalb nicht so sehr geeignet, weil man Erde und Mond als ein abgeschlossenes System betrachten kann, für das dann der Satz von der Erhaltung des Gesamtdrehimpulses gilt. Wird der Rotationsdrehimpuls der Erde kleiner, so muss der Drehimpuls des Mondes entsprechend zunehmen, was im wesentlichen seinen Bahndrehimpuls angeht; der Rotationsdrehimpuls des Mondes ist demgegenüber zu vernachlässigen. Damit ergibt sich eine Veränderung der Elemente der Mondbahn, vor allem seiner mittleren Entfernung und seiner Exzentrizität, die aber theoretisch nicht exakt zu berechnen sind; dafür müsste man die durch die Gezeitenreibung bewirkten sekundären Gezeitenwellen im einzelnen quantitativ sehr genau kennen. Im Gegensatz zum Mond spiegeln sich hingegen bei der Sonne, bei Merkur und bei Venus Änderungen der Erdrotation völlig rein in ihren Bewegungsänderungen wieder; sie sind bei der Sonne erstmals 1906, später auch bei Merkur und Venus entdeckt worden. Aus genauen Beobachtungen dieser Himmelskörper in den letzten zwei bis drei Jahrhunderten und aus antiken Berichten aus den vergangenen zwei bis drei Jahrtausenden hat man nun die Vergrösserung der Rotationsdauer der Erde abgeleitet. Man macht aufgrund all' dieser Untersuchungen den Ansatz, dass die Tageslänge pro Julianisches Jahrhundert von 36525 Tagen konstant um 0.00164^s zunimmt. Der erste Tag eines neuen Jahrhunderts ist stets um 0.00164^s länger als der erste Tag des gerade abgelaufenen Jahrhunderts, oder jedes Jahrhundert ist um $36525 \times 0.00164^s = 59.90^s$ länger als das vorhergehende.

Ganz allgemein wäre zu diesem Zahlenwert noch zu bemerken, dass antike Berichte über Finsternisse mit grosser Vorsicht und sehr kritisch aufzunehmen sind. Die Angaben über Ort, Zeit und Grösse von Finsternissen sind keineswegs immer sehr zuverlässig; sie sind ungenau und sind bisweilen für religiöse Propaganda oder sonstige Zwecke entstellt, auch ist die richtige Datierung oft ungewiss. Abgesehen davon sind gewisse Anzeichen vorhanden, als ob um das Jahr 700 ein merklicher Sprung erfolgte, ob bei der Erdrotation oder bei der Mondbewegung oder bei beiden, ist ungeklärt. Schliesslich stimmt auch der aus der Gezeitenreibung berechnete Wert, wobei die küstennahen, flachen Randmeere die grösste Rolle spielen, nicht so ganz mit dem astronomisch abgeleiteten überein, an dessen Konstanz man auch bisweilen zweifelt; vielleicht sind doch auch noch andere nicht bekannte Effekte wirksam. Eventuelle spätere Änderungen des genannten numerischen Wertes dürfen deshalb nicht überraschen, aber im ganzen gesehen wurde doch damit eine befriedigende Darstellung der Beobachtungen erreicht.

Erschwert wurde indes diese ganze Bestimmung noch durch die unregelmässigen Änderungen der Dauer der Erdrotation. Die Ursachen dieser sogenannten Fluktuationen dürften in Massenverlagerungen im Erdinnern zu suchen sein, vielleicht auch im Rutschen des Erdmantels gegen den Erdkern. Es sind offenbar keine vereinzelt auftretenden, markanten Ereignisse, sondern eher eine Vielzahl kleiner Vorgänge. Da aber dadurch der Rotationsdrehimpuls der Erde nicht geändert wird, wird auch die Mondbewegung nicht beeinflusst, so dass die Abweichungen des beobachteten Mondortes vom theoretisch berechneten Ort, denen man ursprünglich den Namen Fluktuationen gegeben hatte, diese Unregelmässigkeiten der Erdrotation, auf die man dann später die Bezeichnung Fluktuationen übertrug, völlig rein wiederspiegeln. Den gleichen Effekt muss man aber auch bei der Sonne, bei Merkur und bei Venus beobachten, nur im verkleinerten Maßstab, und dieser Nachweis, der erstmals 1914 gelang, bestätigt die Richtigkeit der Vorstellung, dass es sich wirklich um Unregelmässigkeiten der Erdrotation handelt. Mit Hilfe von genauen Mondbeobachtungen, vor allem von Sternbedeckungen durch den Mond, konnte man die Fluktuationen bis etwa zum Jahre 1680 zurückverfolgen.

In grossen Zügen erhält man von ihnen folgendes Bild. Die Tageslänge war von 1680 bis 1780 grösser als die zugehörige säkular zunehmende mit einem maximalen Überschuss von etwa $+ 0.0015^s$ um 1730; nach 1780 war die Tageslänge kürzer als die reguläre säkular zunehmende, und zwar erfolgte die Abnahme zuerst langsam, dann rascher bis auf etwa $- 0.0017^s$

um 1830, darauf stieg sie wieder bis auf – 0.0003^s um 1844 an, um hernach zuerst langsam, später sehr schnell zu einem spitzen Minimum von – 0.0047^s um 1871 abzunehmen. Von hier wuchs die Tageslänge zuerst sehr rasch, nachher verzögert auf durchschnittlich – 0.0018^s um 1887, wurde alsdann wieder grösser, war um 1897 gleich der regulären Tageslänge, stieg weiter an auf + 0.0017^s zwischen 1902 und 1909, nahm von da an stetig ab, die reguläre Tageslänge um 1917 wieder erreichend, bis zu einem Minimum von – 0.0021^s bis – 0.0025^s zwischen 1927 und 1935. Seither hat die Tageslänge wellenförmig zugenommen bis auf rund – 0.0004^s im Vergleich zur regulären Tageslänge um 1970.

Für die Berechnung der Örter der Himmelskörper, Sonne, Mond, Planeten, benötigt man eine gleichförmige Zeit, eine sogenannte Inertialzeit oder NEWTONsche Zeit, denn die Bewegungen der Himmelskörper leitet man aus den aus der NEWTONschen Mechanik folgenden Differentialgleichungen ab, in denen diese Inertialzeit als unabhängige Variable auftritt. Solch eine gleichförmige Zeit liegt selbstverständlich auch den NEWCOMBschen Tafeln für die Bewegung der Sonne zugrunde, aus denen wir die Sonnenörter, die Basis unserer mittlerer Sonnenzeit oder Weltzeit, entnehmen. Man ist nun 1950 übereingekommen, diese gleichförmige Zeit der NEWCOMBschen Tafeln Ephemeridenzeit (Ephemeris Time = ET) zu nennen. Die in den Jahrbüchern publizierten Koordinaten von Sonne, Mond und Planeten, die Ephemeriden, gelten streng für diese Ephemeridenzeit. Die Zeit unserer Erduhr UT1, die auf der Rotationsdauer der Erde beruht, oder auch die schon wegen der jahreszeitlichen Schwankungen korrigierte Zeit UT2 weicht aber aus all den diskutierten Gründen von der gleichmässigen Ephemeridenzeit ab. Man definiert nun allgemein:

$$ET = UT + \Delta T$$

wobei man für UT UT2 nimmt, so dass in ΔT die säkulare konstante Zunahme der Dauer der Erdrotation und der Einfluss der Fluktuationen enthalten sind. Der Anteil des erst genannten Einflusses ist genau festgelegt und zu berechnen, den Anteil des letzteren kann man erst nachträglich aus der Beobachtung gewinnen, am besten aus der Beobachtung des Mondes. ΔT wird in den astronomischen Jahrbüchern publiziert, die stets einige Zeit vor dem laufenden Jahr herausgegeben werden, so dass die Werte von ΔT für die Jahre, aus denen noch keine Beobachtungen vorliegen, extrapoliert sind. Will man die veröffentlichten, streng für Ephemeridenzeit geltenden Koordinaten von Sonne, Mond, Planeten für die Weltzeit UT, also für die Beobachtungszeit, haben, so muss man sie mit ET = UT + ΔT aus den Tabellen interpolieren.

Aus der Ephemeridenzeit hat man auch die astronomisch definierte Zeiteinheit, die Ephemeridensekunde, durch die Festsetzung entnommen, dass das tropische Jahr, wie es sich nach den NEWCOMBschen Tafeln für 1900 Jan. 0,12^h ET ergibt, 31 556 925,9747 Ephemeridensekunden enthält. Nebenbei sei erwähnt, dass die Länge des tropischen Jahres, also die Zeit, nach der die Sonne wieder die gleiche Position inbezug auf den Frühlingspunkt hat, säkular abnimmt, in 1000 Jahren um 5.30 Sekunden. 86 400 Ephemeridensekunden bilden den Ephemeridentag, und wir wollen einmal die Länge des konstanten Ephemeridentages mit der des Weltzeittages vergleichen. Die NEWCOMBschen Tafeln sind auf Beobachtungen aus den Jahren von etwa 1690 bis 1890 aufgebaut. Berücksichtigt man nur die säkulare Änderung der Erdrotation, so war in diesem Zeitraum die Tageslänge im Mittel um 1.8 ms (1 ms = 0.001^s) kürzer als 1900. Die Fluktuationen vergrösserten die Tageslänge in der ersten Hälfte dieses Zeitraums im Mittel um etwa 1.0 ms, verringerten sie in der zweiten Hälfte im Mittel um rund 1.4 ms. Fasst man beide Einflüsse zusammen, so heisst das, dass der in den NEWCOMBschen Tafeln benutzte mittlere Tag, den wir jetzt Ephemeridentag nennen, um etwa 2.0 ms kürzer sein wird als der Weltzeittag um 1900. In dieser Weise ist auch die im ORION 29, S. 175 angeführte Formel für ΔT zu verstehen:

$$\Delta T = ET - UT2 = + 24.349^s + 72.318^s\ T + 29.950^s\ T^2 + 1.82\ 144\ B,$$

wobei T in Julianischen Jahrhunderten zu 36 525 Tagen und B, die Fluktuationen, in Bogensekunden gezählt sind. Die Formel ist so angepasst, dass ΔT im Zeitraum 1690 bis 1890 im Mittel möglichst klein wird. Das erste Glied sorgt dafür, dass in der Nähe von 1900 ET etwa gleich UT ist, dass also hier der Beginn des Ephemeridentages mit dem Beginn des Weltzeittages nahezu zusammenfällt, was praktisch für 1903.2 erfüllt war. Das zweite Glied berücksichtigt, dass der Weltzeittag um 1900 ungefähr 2 ms länger ist als der Ephemeridentag, es ist 72.318^s/36525 = 0.00198^s. Das dritte Glied enthält die säkular zunehmende Tageslänge von 0.00164^s pro Jahrhundert; diese Zunahme liefert uns die Differentiation des drittes Gliedes: 2 × 29.950^s T = 59.9^s pro Jahrhundert, 59.9^s/36 525 = 0.00164^s pro Tag. Das vierte Glied schliesslich erfasst den Einfluss der Fluktuationen B, wobei B die Differenz: Beobachtete minus berechnete Länge des Mondes ist; B war 1900.0 – 15.8″, also das 4. Glied: – 28.8^s und somit ΔT = + 24.3^s – 28.8^s = – 4.5^s.

Inzwischen ist es gelungen, nach den Quarzuhren, bei denen eine Genauigkeit von 0.1 ms pro Tag oder, da der Tag 86 400 Sekunden hat, von $1 \times 10^{-4}/8.64 \times 10^4$ oder rund 10^{-9} erreicht wird, auf den sehr konstanten Schwingungen von Atomen aufbauend, Atomuhren zu konstruieren, bei denen man zu Genauigkeiten von etwa 10^{-12} kommt, das wären etwa 0.1 μs pro Tag (1 μs = 0.000 001^s) oder 0.003^s pro Jahrhundert. Das ist eine Genauigkeit, die alles Bisherige weit übersteigt. Damit war es naheliegend, die Zeiteinheit nicht mehr astronomisch, sondern physikalisch durch Atomschwingungen zu definieren, wo-

bei man die Atomsekunde möglichst gut der Ephemeridensekunde anpassen wollte.

Nach diesbezüglichen Vergleichen in den Jahren 1955 bis 1958 hat man 1967 endgültig festgesetzt, dass die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung entsprechend dem Übergang zwischen den zwei Hyperfeinniveaus des Grundzustandes des Caesium-Atoms 133 eine Atomsekunde ist. Diese Linie hat im Spektrum eine Wellenlänge von 3.261226 cm gemäss der Relation $\lambda \times \nu = c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit von 299792.5 km/s ist. Die Anpassung an die Ephemeridensekunde wird mit $\pm$ 20 Hz (Hz = Zahl der Schwingungen pro Sekunde) angegeben, also $\pm 20/9 \times 10^9 = \pm 2 \times 10^{-9}$, wobei diese Unsicherheit aber einzig an der astronomischen Zeit liegt. Dem entsprechend wählte man von jetzt an die Atomzeit (Atomic Time = AT) als die normale Zeitskala. Auch hier wollte man, als man die Atomzeit erstmals schon 1958 einführte, dass Atomzeit und Weltzeit möglichst gut übereinstimmen und setzte deshalb für 1958 Jan. $1{,}0^h$ UT: UT2 – AT = $+ 0.0039^s$, und da 1958.0 ΔT nahe $+ 32.15^s$ war, gilt demnach: AT = ET – 32.15^s. Mit der Atomzeit hat man nun eine völlig gleichmässige Zeitskala und es ist jetzt nur noch nötig, durch astronomische Beobachtungen auf einer Anzahl ausgewählter Zeitdienstobservatorien die Verbindung zwischen der beobachteten Zeit UT und der Atomzeit AT herzustellen. Die Bearbeitung aller dieser Beobachtungen erfolgt einheitlich durch das Bureau International de l'Heure (BIH) in Paris und wird laufend publiziert. Damit nun aber auch jeder, der genaue Weltzeit, also die Zeit unserer Erduhr, braucht, wie z. B. die Astronomen und die Geodäten bei ihren Messungen, stets einen guten Näherungswert für die Weltzeit hat, strahlen eine ganze Anzahl von Zeitzeichensendern seit 1961 eine von der Atomzeit abgeleitete koordinierte Weltzeit (Coordinated Universal Time) UTC aus. Die Definition von UTC wurde dabei seit 1972 geändert, und das ist der Grund, warum wir jetzt solche Zeitsprünge von einer vollen Sekunde konstatieren.

Bis zum Ende von 1971 hatte man für UTC folgende Festsetzung getroffen: UTC soll der momentanen mittleren Rotationsdauer der Erde, also UT2, möglichst gut angepasst sein, es soll stets $|UT2 - UTC| < 0.1^s$ sein. Deshalb strahlt man eine Zeit aus, bei der die Sekunde möglichst gut genähert die UT-Sekunde, aber für längere Zeit konstant ist, und leitet diese UT-Sekunde von der AT-Sekunde ab, indem man die Frequenz angemessen ändert. Diese Frequenzänderung $\Delta f/f$, auch Offset genannt, erfolgt immer nur, wenn nötig und nach vorheriger Ankündigung zu Beginn eines Jahres und zwar in ganz bestimmten festen Schritten von $\Delta f/f = 50 \times n \times 10^{-10}$ mit n = 0, $\pm$ 1, $\pm$ 2, $\pm$ 3, ... usw. Weicht im Laufe eines Jahres UTC von UT2 stärker ab, so führt man rechtzeitig zu Beginn eines Monats, was man vorher natürlich meldet, einen Sprung von 0.1^s ein. Formelmässig kann man schreiben: UTC = $(1 + \Delta f/f)$ AT + D, mit der Bedingung $|D| < 0.1^s$. Da die Erde in diesem Jahrhundert langsamer rotiert als um 1790, auf welcher Epoche der Ephemeridentag und damit auch die Atomsekunde basieren, ist der momentane UT-Tag länger als der AT-Tag; die AT-Uhr eilt der UT-Uhr stets voraus, es ist (AT – UT) > 0, so dass man auf der rechten Seite der Gleichung etwas subtrahieren muss. Die AT-Uhr muss langsamer laufen, $\Delta f/f$ muss negativ angesetzt werden, die AT-Uhr muss in der AT-Sekunde weniger Schwingungen vollführen. So war z. B. für 1964 und 1965 der Offset zu -150×10^{-10} (n = –3) angesetzt, von 1966 bis Ende 1971 zu -300×10^{-10} (n = –6), und Sprünge um -0.1^s erfolgten am 1. April und 1. Sept. 1964, am 1. Jan., 1. März, 1. Juli, 1. Sept. 1965 und dann noch einmal um $+ 0.1^s$ am 1. Febr. 1968. Man kann nach den früheren Angaben leicht ausrechnen, dass der UT-Tag 1966.0 wegen der säkularen Abnahme 1.08 ms länger als der UT-Tag von 1900.0 und dieser wegen der Anpassung an die Tageslänge der NEWCOMB-schen Tafeln 1.98 ms länger als der ET-Tag oder der AT-Tag war. Da andererseits der UT-Tag 1966.0 wegen der Fluktuationen 0.75 ms kürzer als der säkular länger werdende UT-Tag 1966.0 wurde, so heisst das: Der UT-Tag 1966.0 ist um 2.31 ms länger als der AT-Tag oder um 2.31 ms/86400 s = 2.67×10^{-8} länger, was dann weiter bis auf 3.10×10^{-8} für 1970.0 anwuchs. Der Offset von 3×10^{-8} ergab also für diesen Zeitraum eine recht befriedigende Anpassung.

Von 1972 an hat man die Regelung für UTC geändert. Der Offset wird abgeschafft, es ist also stets die UTC-Sekunde gleich der AT-Sekunde. Da indes der UT-Tag schon jetzt länger als der AT-Tag ist und wegen der säkularen Zunahme ständig, wegen des zusätzlichen Einflusses der Fluktuationen mehr oder weniger rasch anwächst (er kann auch vorübergehend wieder abnehmen), divergieren die UT-Skala und die UTC-Skala nun schneller als früher, man wird also häufiger Sprünge einfügen müssen als bei der früheren UTC-Zeit. Man hat sich nun geeinigt, dass diese Sprünge stets eine volle Sekunde betragen und im allgemeinen nur am 30. Juni und am 31. Dezember erfolgen, notfalls auch mal am Ende eines anderen Monats, wobei die Bedingung zu erfüllen ist, dass $|UTC - UT1|$ nicht grösser als 0.7^s wird. Bei einem positiven Sprung wird eine Sekunde eingeschoben. Das ist nötig, wenn die rascher laufende UTC-Uhr gegen die Erduhr UT1 zu weit vorging. Man stellt dann die UTC-Uhr um eine Sekunde zurück und zwar beziffert man nun die aufeinanderfolgenden Sekunden in der folgenden Weise: 30. Juni 23^h59^m ... 57^s, 58^s, 59^s, 60^s, ↑ 1. Juli 0^s, 1^s, 2^s, ... Geht die UTC-Uhr hingegen einmal gegen die Erduhr UT1 nach, so erfolgt ein negativer Sprung, man stellt die UTC-Uhr um eine Sekunde vor, lässt also eine Sekunde weg und beziffert jetzt die aufeinanderfolgenden Sekunden: 30. Juni 23^h59^m... 56^s, 57^s, 58^s, ↑ 1. Juli 0^s, 1^s, 2^s, ... Solche negativen Sprünge werden kaum, zumindest selten nötig sein, da die Erduhr gegen die

UTC-Uhr zunehmend langsamer läuft; es müssten schon für längere Zeit die Fluktuationen eine stark verkürzte Rotationsdauer der Erde bewirken. Man kann sich ausrechnen, dass ohne den Einfluss der Fluktuationen die Erduhr gegen die UTC-Uhr pro Jahr: 1970 um 1.14,^{s} 1975 um 1.17^s, 1980 um 1.20^s nachgehen wird, es wäre also pro Jahr mindestens ein positiver Sprung nötig. Der Vorteil dieser neuen Regelung ist erstens darin zu sehen, dass nunmehr die von den Zeitzeichensendern ausgestrahlten Sekundensignale stets AT-Sekunden sind und immer gleichmässig weiterlaufen, man muss also bei der Ausstrahlung überhaupt nichts mehr ändern; nach Bedarf ändert sich nur die Beschriftung dieser Signale. Zweitens ist es ein Vorteil, dass sich UTC und AT, jetzt IAT (International Atomic Time) genannt, stets um volle Sekunden unterscheiden. Der Übergang von der alten UTC-Zeit zur neuen UTC-Zeit geschah am Ende des 31. Dezembers 1971. In Hinblick auf die geplante neue Regelung hatte man bei der alten UTC-Zeit 1971 keinen Sprung von 0.1^s mehr eingefügt, obwohl bereits Anfang September $|UT2 - UTC| > 0.1^s$ geworden war und weiter bis zum Jahresende anstieg. Am 31. Dez. um 24^h war andererseits IAT – UTC alt = 9.8922^s. Nun änderte man die Frequenz der UTC-Uhr, indem man den Offset von -300×10^{-10} beseitigte, dass von nun an also die UTC-Uhr stets gleich schnell wie die IAT-Uhr läuft, und stellte die UTC-Uhr um 0.1077577^s zurück, so dass jetzt exakt IAT – UTC neu = 10.0000^s wurde und so blieb. Diese Umstellung erfolgte 1971 Dez. 31, 23^{h}59^{m}60.1077577^s UTC alt = 1972 Jan. 1, 0^{h}0^{m}0^s UTC neu, und für den gleichen Moment galt UT1 – UTC neu = – 0.0432^s, UT2 – UTC neu = – 0.0483^s. Da inzwischen UT1 – UTC entsprechend der nach Aufhebung des Offsets zu schnell laufenden UTC-Uhr absolut genommen weiter anwuchs, auf – 0.6409^s am 30. Juni 24^h, wurde zu diesem Zeitpunkt ein positiver Sprung von einer vollen Sekunde angeordnet, so dass nunmehr IAT-UTC = 11.0000^s und UT1-UTC = + 0.3591^s war. Ein weiterer positiver Sekundensprung erfolgte am 31. Dez. 1972 24^h, wobei nun allerdings am 1. Januar 1973 entgegen der ursprünglichen Regel UT1-UTC = + 0.8107^s, also grösser als 0.7^s geworden ist, während jetzt IAT-UTC = 12^s ist.

Provisorische Werte für UT2-UTC, UT1-UTC auf 0.1 ms und für die Koordinaten x, y des instantanen Pols bezogen auf den CIO auf 0.001″ werden mit einer Verzögerung von ein bis zwei Monaten in Zirkularen des BIH publiziert, so dass jeder, der sehr genaue Zeit braucht, z. B. für exakte astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen, diese Korrekturen bald zur Verfügung hat. Gut genähert kann man sie auch für kurze Zeitintervalle extrapolieren. Viele Zeitzeichensender ermöglichen durch Charakterisierung bestimmter Sekundensignale nach der vollen Minute, dass man nach einem festgelegten Code daraus UT1-UTC auf 0.1^s genau entnehmen kann. Der schweizerische Zeitzeichensender HBG in Prangins am Genfersee, der auf 75 kHz entsprechend etwa 4km Wellenlänge sendet, macht allerdings davon keinen Gebrauch, da die erwähnte Extrapolation bequem und stets völlig ausreichend durchgeführt werden kann.

Nach all diesen Ausführungen über die etwas komplizierten Zeitverhältnisse sollte es nun aber doch klar geworden sein, dass die so beachteten Sekundensprünge unserer Uhrzeit nichts Ungewöhnliches und Abnormales in der Rotation unserer Erde darstellen, sondern nur an der Anpassung unserer Zeitskala an die Atomzeitskala liegen.

Résumé La rotation de la Terre

En se référant aux sauts de seconde intervenus récemment par deux fois, l'auteur examine de plus près la rotation de la Terre et les définitions de l'heure. Alors que, pour la vie journalière, l'horloge terrestre basée sur la rotation de la Terre ou le temps universel TU est bien appropriée, elle ne remplit pas les conditions d'un cours de temps exactement uniforme. Les diverses irrégularités de l'horloge terrestre, les mouvements de la Terre par rapport à son axe de rotation et les variations saisonnières de la vitesse de rotation de la Terre, le ralentissement continu dû au frottement des marées, les changements irréguliers de mouvement d'une durée prolongée sont discutés séparément et les diverses notions de temps TU0, TU1, TU2 ainsi que le temps des éphémérides qui en est déduit sont examinés. En pratique, l'horloge atomique nous fournit aujourd'hui le temps le plus exact. C'est pourquoi on a adapté l'un à l'autre le temps atomique et le temps des éphémérides et déduit maintenant du temps atomique international TAI le temps universel coordonné TUC, qui est transmis par les émetteurs radioélectriques des signaux horaires. L'échelle de temps TUC est subdivisée en secondes atomiques et TUC est approximativement le temps de l'horloge terrestre, mais pour toutes les raisons discutées différera toujours de nouveau du temps véritable de l'horloge terrestre, qu'on détermine par observations astronomiques. Afin que la différence entre TAI et TUC reste toujours inférieure à une seconde, il faut le cas échéant faire intervenir dans le TUC une seconde intercalaire positive ou négative; dans ce but, l'horloge TUC est retardée ou parfois aussi avancée d'une seconde. Ces sauts de temps n'ont pas frappé plus tôt les observateurs parce qu'avant 1972 les fréquences de l'horloge TUC étaient décalées, de sorte qu'il n'était nécessaire d'introduire que de petits sauts de 0,1 seconde. L'auteur commente les avantages et inconvénients des deux systèmes TUC.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Helmut Müller, Herzogenmühlestrasse 4, CH-8051 Zürich.