

# Die Technik der atomaren Frequenz- und Zeitbestimmung

Autor(en): **De Prins, J. / Kartaschoff, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **37 (1959)**

Heft 1: **Zeit- und Frequenzbestimmung = La détermination du temps et de la fréquence**

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875421>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Die Technik der atomaren Frequenz- und Zeitbestimmung

531.764.5

## Problemstellung

Die atomaren Frequenznormale haben gegenwärtig in erster Linie folgende Anwendung:

1. Primäres Frequenznormal zu Eichzwecken
2. Definition einer atomaren Zeit (Atomuhr)

In beiden Fällen besteht die Aufgabe im allgemeinen darin, das atomare Frequenznormal mit einem Quarzoszillator zu vergleichen. Im ersten Falle ist der zu eichende Prüfling ein Quarzoszillator, der als sekundäres Frequenznormal dient, und im zweiten dient eine Quarzuhr zur Integration der atomaren Normalfrequenz.

## Vergleichsmethoden

Eine Präzisionsfrequenzmessung, das heisst der Vergleich der Frequenzen zweier Oszillatoren, geschieht immer durch Überlagerung von Grundfrequenzen oder Harmonischen und Messung der Differenz in Form einer Schwebung. Es ist offensichtlich, dass die relative Genauigkeit eines solchen Vergleiches sehr weit getrieben werden kann. Bei 10 000 MHz stellt zum Beispiel eine Schwebung von 1 Hz eine relative Abweichung von  $10^{-10}$  dar.

Die Messung der Schwebungsfrequenz kann auf folgende Arten erfolgen:

- a) Langsame Schwebungen:

Beobachtung am Oszillographen (*Lissajous*-Figur und daraus abgeleitete Spezialverfahren) und Messung mit Stoppuhr.

- b) Rasche Schwebungen:

Messung mit elektronischen Zählern und Frequenzmessern mit der Möglichkeit, die Resultate laufend zu registrieren.

Als Beispiel zeigt Figur 1 ein Blockschema der Frequenzmeßeinrichtung, wie sie im Laboratoire suisse de recherches horlogères in Neuenburg zum Vergleich der 100-kHz-Quarzuhrfrequenz mit den  $NH_3$ -Maser-Oszillatoren verwendet wird.

Der Anschluss der beiden Frequenzen aneinander erfolgt über einen Hilfsoszillator, der auf einer Frequenz von 8500,756 kHz arbeitet, wobei diese Frequenz in engen Grenzen verändert werden kann. Durch Frequenzvervielfachung mit einem Faktor von 2808 erhält man ein Signal von 23 870 MHz. Das ist zugleich die vom Maser erzeugte Frequenz. Mittels eines Mikrowellen-Überlagerungsempfängers wird nun die Schwebung dieser beiden Signale auf dem Schirm eines Oszillographen sichtbar gemacht. Der Hilfsoszillator wird nun so eingestellt, dass diese Schwebungsfrequenz Null wird, so dass die Frequenz des Hilfsoszillators gleich dem 2808ten Teil der  $NH_3$ -Normalfrequenz ist.

Gleichzeitig wird die Frequenz des Hilfsoszillators mit der der Quarzuhr verglichen. Dies geschieht durch Überlagerung der 85. Harmonischen des 100-kHz-Quarzuhrsignals mit dem Hilfsoszillatorsignal, wodurch ein Differenzsignal von etwa 756 Hz entsteht.

Das 756-Hz-Signal steuert über einen Untersetzter eine Torschaltung am Eingang eines Zählers, der über das Tor mit 100 kHz gespeist wird. Der Unter-

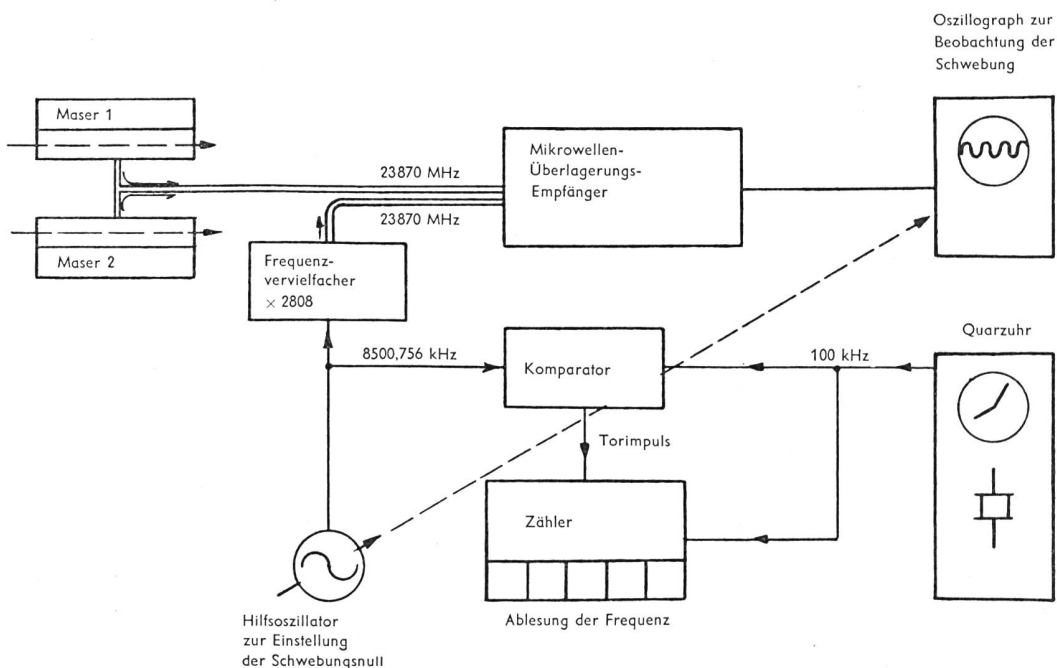


Fig. 1.  
Frequenzmeßsystem  
der Ammoniak-Maser-  
Oszillatoren des LSRH  
in Neuchâtel

setzungsfaktor ist so gewählt, dass etwa alle 8 Sekunden ein Resultat gedruckt wird, wobei die Ablesgenauigkeit (Einheit der letzten Stelle) etwa  $10^{-10}$  beträgt.

Der Ammoniak-Maser ist ein Oszillator-Normal. Wir verfügen über eine direkt erzeugte elektrische Schwingung, wobei es nur noch darum geht, deren Frequenz zu messen. Beim Cäsium-Frequenznormal ist die Situation etwas anders, da es sich hier um einen passiven Resonator handelt, der von aussen mit einem Signal angeregt und eine Resonanzkurve abgetastet wird. Die Einstellung auf das Maximum kann entweder von Hand oder mit einer Regelautomatik erfolgen.

### Frequenzvervielfachung

Entgegen noch verbreiteten Ansichten stellt die Frequenzvervielfachung an sich hinsichtlich Phasenstabilität keine besonderen Probleme. Es sind vielmehr die Oszillatoren, die in dieser Hinsicht etwas genauer betrachtet zu werden verdienen.

### Stabilität von Quarzoszillatoren

Die bisher aufgestellten Kriterien (zum Beispiel von *Scheibe* [1] und *Smith* [2, 3]) zur Beurteilung der Qualität von Normalfrequenzgeneratoren und Quarzuhren, beziehen sich ausschliesslich auf die *Langzeitstabilität*. Darunter verstehen wir die Stabilität der über Perioden von zwei oder mehr Wochen *gemittelten* Frequenz.

Tägliche Schwankungen und Sprünge in der Grössenordnung  $10^{-9}$  werden durch diese Kriterien nicht erfasst.

Die neue Technik der atomaren Frequenznormale verlangt aber und ermöglicht zugleich praktisch *momentane Frequenzmessungen* mit einer um zwei Grössenordnungen besseren Reproduzierbarkeit. In diesem Zusammenhang wird daher die Kurzzeitstabilität und insbesondere die Freiheit von Sprüngen der Frequenz für die Beurteilung der Brauchbarkeit eines Quarzoszillators bedeutsam.

Schliesslich muss, damit eine Überlagerungsmessung im Mikrowellengebiet möglich ist, die Phasenstabilität oder, anders gesagt, die *spektrale Reinheit* der erzeugten Schwingung genügend sein. Diese letzte Bedingung wird von den für Quarzuhren gebräuchlichen 100-kHz-Quarzoszillatoren nicht erfüllt. Dagegen genügen Oszillatoren höherer Frequenzen (5 MHz und mehr) meistens in dieser Hinsicht.

Ein Beispiel für das Versagen der herkömmlichen Betrachtungsweise gibt Figur 2. In der obersten Kurve ist die Alterung eines Quarzoszillators über sechs Monate dargestellt. Diese Kurve ergibt eine mittlere Frequenzdrift von weniger als  $10^{-10}$  je Tag, wenn man von der Einlaufperiode absieht. Diese Angabe ist aber für momentane Frequenzmessungen sinnlos, denn die mittlere und die untere Kurve zeigen, dass die täglichen und die kurzzeitigen Schwankungen der Frequenz etwa  $5 \cdot 10^{-9}$  betragen, also fünfzigmal grösser sind. Glücklicherweise sind solche Extrem-

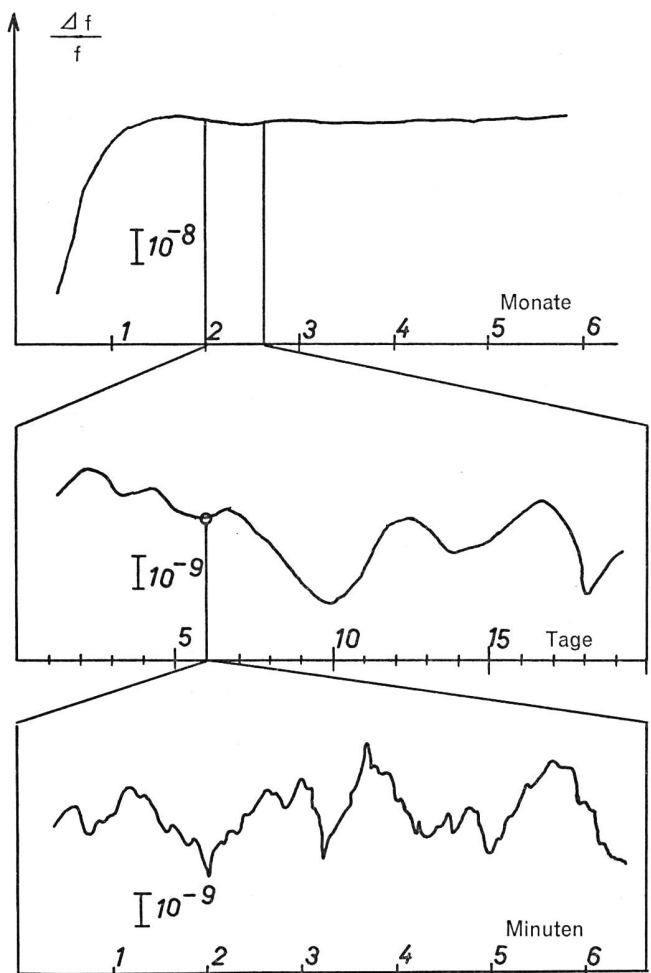


Fig. 2. Beispiel für die Frequenzkonstanz eines Quarznormals über längere und kürzere Zeiträume

fälle eher die Ausnahme als die Regel. Das Beispiel soll nur zeigen, dass es nötig ist, auch die Kurzzeitstabilität zu betrachten.

### Definition einer atomaren Zeit

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, ein atomares Frequenznormal ständig laufen zu lassen und dessen Schwingungen zu zählen, wie dies üblicherweise bei der Quarzuhr geschieht. Falls man aber genügend stabile Quarzuhren zur Verfügung hat, ist folgende Methode viel einfacher (s. Figur 3):

1. Man misst in periodischen Abständen die Frequenz der Quarzuhr und ermittelt deren relative Frequenzkorrektur, bezogen auf die Frequenz des atomaren Frequenznormals;
2. Die Messpunkte werden durch gerade Strecken verbunden (lineare Interpolation);

3. Man bildet das Integral  $\int_0^t \frac{\Delta f}{f} dt = \Delta T_a$

und erhält damit zum Zeitpunkt  $t$  die Korrektur  $\Delta T_a$  des Standes der Quarzuhr  $T_Q$ , um den Stand  $T_A$  der Atomuhr zu erhalten.

$$T_A = T_Q + \Delta T_a$$

Der durch die lineare Interpolation eingeführte Fehler hängt nun eben von der Stetigkeit der Alterung der Quarzuhr ab. Mit den uns zur Verfügung stehenden Quarzuhrn beträgt er  $\pm 2\sqrt{T}$  ms, wobei T in Jahren ausgedrückt ist. Da die atomare Normalfrequenz nur auf  $\pm 10^{-10}$  genau bestimmt ist, wird der totale Fehler der atomaren Zeitdefinition

$$\pm (3T + 2\sqrt{T}) \text{ ms}$$

#### Vergleich verschiedener Atomuhren untereinander und Anschluss an die klassische Definition der Zeit [4]

Für den Vergleich mit den astronomischen Zeitbestimmungen bestehen zwei Möglichkeiten:

##### a) Vergleich der Korrekturen des Standes

Die atomare Zeit TA wird direkt mit der astronomisch bestimmten Universalzeit TU oder der Ephemeridenzeit TE verglichen.

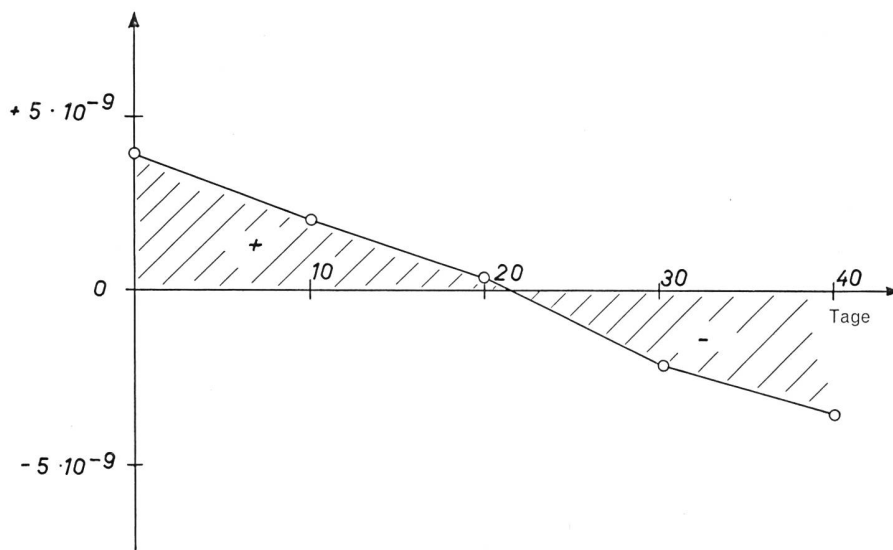


Fig. 3.

Bestimmung der atomaren Zeit durch periodische Messung und Integration der Frequenzkorrektur einer Quarzuhr mit Hilfe eines atomaren Frequenznormals

##### b) Vergleich der Frequenzen

Durch Differentiation der astronomisch bestimmten Standkorrekturen einer Quarzuhr wird deren Frequenz berechnet und mit der atomaren Normalfrequenz verglichen.

Über die Genauigkeit dieser Methoden gibt *Tabelle I* Auskunft [4]. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die erste Methode viel genauer ist, denn die relativen Fehler der beiden Zeitkorrekturen haben ungefähr dieselbe Grössenordnung. Dagegen ist die Frequenzbestimmung durch Differentiation der astronomischen Daten infolge deren statistischen Eigenschaften mit viel grösseren Unsicherheiten behaftet als die Reproduktion der atomaren Normalfrequenz.

Figur 4 lässt erkennen, wie selbst kleine und rasche Schwankungen in der Erdrotation in der Darstellung der Zeitkorrektur zutage treten, während sie in den Frequenzkorrekturen infolge der grösseren Schwankungsbreite mit viel weniger Sicherheit festgestellt werden können [4].

Der Vergleich verschiedener atomarer Frequenznormale untereinander ist am einfachsten, wenn sich diese im selben Laboratorium befinden. Bei der Übertragung von Normalfrequenzen über Kabel ist darauf zu achten, dass keine Störsignale eingestreut werden.

Für den Vergleich zwischen Frequenznormalen, die weit voneinander entfernt sind, bieten sich folgende Möglichkeiten:

##### a) Frequenzvergleich

Kurzwellenverbindungen scheiden wegen zu grosser Fehler aus.

Langwellenverbindungen: Versuche des National Bureau of Standards auf 16 kHz ergaben Genauigkeiten von besser als  $10^{-9}$  bei einer Messdauer von einigen Stunden. Gleichwertige Resultate ergab der Empfang der Station MSF (Rugby, England) auf 60 kHz in Neuenburg bei einer Messdauer von einer Stunde.

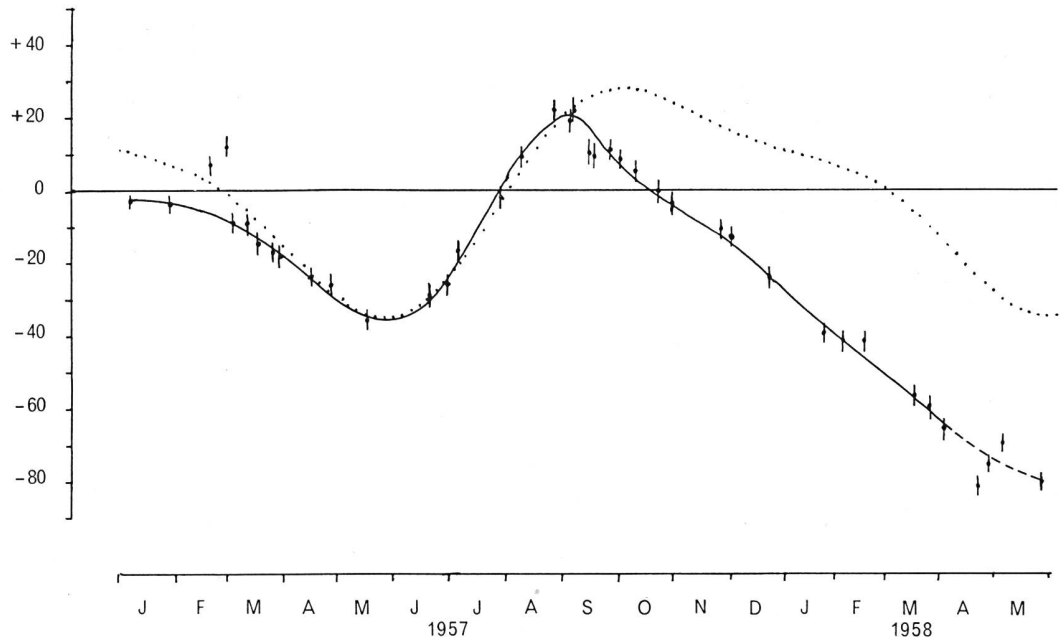
##### b) Zeitvergleich

Die Übertragung von Zeitsignalen auf radioelektrischem Wege erlaubt bei nicht allzu ungünstigen Übertragungsbedingungen eine Genauigkeit, die besser als eine Millisekunde ist.

##### c) Austausch von Korrekturen

Falls an beiden Orten ein gut eingerichtetes Observatorium besteht, kann der Vergleich durch Austausch der astronomischen Zeitkorrekturen erfolgen. Als Übertragungsmittel dient hier also die Erdrotation. Mit dieser Methode wurden die Maser des Laboratoire suisse de recherches horlogères (LSRH) an die Frequenz der Cs-Resonatoren des NPL in Teddington und des NRL in Washington angeschlossen. Die Differenz der beiden ursprünglich angenommenen Frequenzen ergab sich zu  $8,5 \cdot 10^{-9}$ , wobei der Maser den höheren Wert besitzt [5]. Die Differenz erklärt sich dadurch, dass die den Annahmen zugrunde

Fig. 4a.  
Differenz zwischen der Universalzeit  $TU_1$  und der atomaren Zeit vom Januar 1957 bis Mai 1958  
Die Punkte entsprechen Beobachtungen von etwa 100 Sternen mit dem photographischen Zenithfernrohr (PZT) des Observatoriums Neuenburg. Die punktierte Linie gibt die vorausgesagte jahreszeitliche Erdrotationschwankung an



gelegten astronomischen Zeitbestimmungen ( $TU_2$ ) zu verschiedenen Zeiträumen erfolgt waren.

Seit 1956 bezieht sich die offizielle Definition der Sekunde nicht mehr auf die Universalzeit ( $TU_2$ ), sondern auf die Ephemeridenzeit (TE). Durch die Arbeiten von Markowitz, Hall, Essen und Parry [6] wurde die Cs-Normalfrequenz des NPL an diese neue Definition angeschlossen. Somit kann nun auch die  $NH_3$ -Normalfrequenz der LSRH in der neu definierten Einheit ausgedrückt werden. Sie beträgt:

$$23 \cdot 870 \cdot 128 \cdot 879 \pm 50 \pm 6 \text{ Hz}$$

- (1) Fehler der TE-Bestimmung.
- (2) Fehler des Vergleiches Maser-Cs.

Tabelle I

Fehlergrenzen der atomaren und astronomischen Frequenz- und Zeitbestimmungen

Art der Messung	Frequenz	Zeit
atomar . . . . .	$10^{-10}$	$3 T + 2 \sqrt{T}$ ms
astronomisch:		
a) Universalzeit $TU$ . . .	$1,6 \cdot 10^{-9}$	3 ms
b) Ephemeridenzeit TE . . .	$5 \cdot 10^{-9}$	30 ms

Schlussbemerkung

Es wurde schon öfters behauptet, dass es auch Quarzuhren gibt, deren Frequenzstabilität  $\pm 10^{-10}$

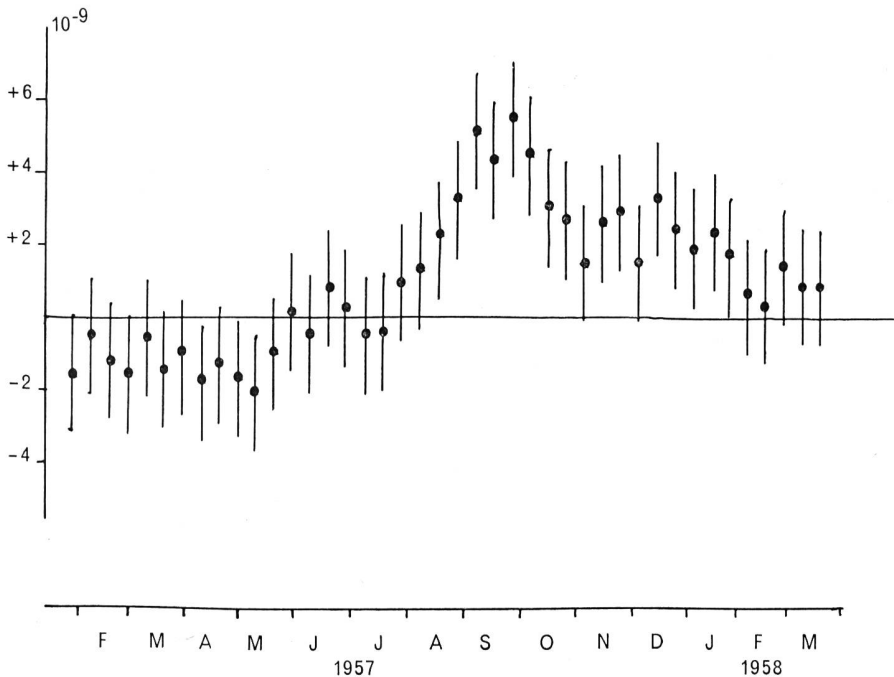


Fig. 4b.

Korrekturen, die an der angenommenen Frequenz des Masers anzubringen sind, um die Frequenz, bezogen auf die Universalzeit  $TU_1$  zu erhalten

beträgt. Dazu ist zu bemerken, dass ein atomares Frequenznormal zu jedem beliebigen Zeitpunkt dieselbe Frequenz mit einem relativen Fehler von  $\pm 10^{-10}$  ergibt. Bei einer Quarzuhr meint man aber damit eine *mittlere* Frequenzänderung von  $\pm 10^{-10}$  je Tag. Wie weit aber die Frequenz der Quarzuhr in einer Woche oder einem Monat abgewichen sein wird, kann man nie mit Sicherheit voraussagen. Erst das atomare Frequenznormal gestattet es, eine über lange Zeiträume konstante Frequenz zu bewahren und damit im Laboratorium eine von den Bewegungen der Himmelskörper unabhängige gleichförmige Zeit zu definieren.

## Bibliographie

- [1] *Scheibe A.* Proc. V<sup>e</sup> Congrès International de Chronométrie, Paris 1954, **1** (1955), 47.
- [2] *Smith H. M.* Monthly Notice Royal Academical Society **113** (1953), 67.
- [3] Ann. Franç. Chronométrie **10** (1956), 95.
- [4] *Blaser J. P.* und *J. De Prins.* Nature **182** (1958), 859.
- [5] *Blaser J. P.* und *J. Bonanomi.* Nature **182** (1958), 859.
- [6] *Markowitz W., R. G. Hall, L. Essen* und *J. V. L. Parry.* Phys. Rev. Letters **1** (1958), 105.

### Adresses der Autoren:

*J. De Prins*, dipl. phys. Université Libre de Bruxelles, Laboratoire suisse de recherches horlogères, Neuchâtel.  
*P. Kartaschoff*, dipl. el. ing. ETH, Laboratoire suisse de recherches horlogères, Neuchâtel.

J.-P. BLASER et W. SCHULER, Neuchâtel

## Problèmes de l'heure astronomique

529.71/74

### Introduction

Le temps a été, depuis l'origine, mesuré et défini à l'aide du mouvement des astres. Pourquoi? En effet, n'importe quel phénomène qui se répète permet, en principe, de mesurer le temps. Les mouvements périodiques des astres, en particulier leur rotation ou révolution, ont fourni à l'homme une horloge parfaite: visible de partout, ne s'arrêtant jamais et surtout si précise qu'encore actuellement sa précision dépasse sensiblement celle des autres étalons fondamentaux, ceux de la masse et de la longueur. Toutefois, l'inexactitude de l'heure basée sur la rotation de la terre, le temps universel, a été mise en évidence il y a un demi-siècle environ par les écarts observés entre les prédictions de la mécanique céleste et l'observation. (Voir *tableau I*).

Ces recherches, prouvant l'existence de variations lentes et irrégulières de la vitesse de rotation de la terre, sont restées sans conséquence en dehors de l'astronomie jusqu'à l'apparition des étalons atomiques de fréquence. Entre temps, les horloges à quartz avaient dépassé très largement la précision des pendules astronomiques et avaient permis de découvrir un autre type d'irrégularité de rotation de la terre, de caractère saisonnier, qui avait échappé jusque là aux méthodes de mécanique céleste qui ne sont utilisables que sur de longs intervalles. Comme nous venons de le voir dans les communications précédentes, les étalons atomiques sont plus que d'excellentes horloges permettant de relier entre elles des déterminations astronomiques. Ils sont de véritables étalons fondamentaux permettant de définir une unité de temps nouvelle qui, à bien des points de vue, est plus satisfaisante que l'unité astronomique. Avant de voir comment faire usage de ces nouvelles possibilités de définir le temps, examinons l'état actuel des techniques astronomiques de mesure du temps.

### Le temps universel

L'heure définie comme temps universel est simplement la phase d'un point fixe sur la terre en rotation (*Greenwich*) mesurée à partir d'une origine. Cette origine, le point vernal, est elle-même mobile à cause des mouvements complexes de précession de la terre provoqués par l'attraction de la lune et du soleil sur le bourrelet équatorial de la terre aplatie. Nous savons aujourd'hui que ce temps universel est loin d'être uniforme au cours du temps, mais subit des variations

Tableau I

La différence entre le temps des éphémérides et le temps universel depuis l'année 1800.  $T_E - T_U$  indique le retard de la rotation de la terre,  $\Delta v/v$  est l'écart de la fréquence de rotation

Epoque	$T_E - T_U$	$\Delta v/v$	Epoque	$T_E - T_U$	$\Delta v/v$
	s	$10^{-8}$		s	$10^{-8}$
1800.0	+6.4		1910.0	+9.3	-4.4
1805	+5.3		1915	+15.8	-3.4
1810	+4.4		1920	+20.1	-2.1
1815	+3.6		1925	+22.6	-0.8
1820	+4.0	+1.7	1930	+23.1	-0.4
1825	+2.9	+1.1	1935	+23.6	0.0
1830	+1.7	+0.6	1940	+23.9	-1.0
1835	+0.2	+1.3	1945	+26.2	-1.6
1840	+0.3	-0.7	1950	+29.3	-1.8
1845	+1.0	-0.8	1952.8	+29.6	
1850	+2.2	-0.6	1953.3	+30.7	
1855	+3.4	-0.4	1953.8	+30.3	
1860	+3.7	+0.4	1954.3	+30.1	
1865	+1.7	+1.3	1954.8	+29.7	
1870	-1.0	+3.5	1955.3	+30.2	
1875	-6.8	+2.1	1955.8	+30.1	
1880	-7.7	+0.2	1956.3	+30.6	
1885	-7.9	-0.3	1956.8	+30.2	
1890	-7.6	+0.3	1957.3	+30.5	
1895	-7.3	-0.9	1957.8	+31.4	
1900	-4.5	-3.4	1958.3	+31.0	
1905	+2.6	-4.6			