

Allgemeines. Die Quarzuhr ist ihrem Wesen nach ein Wechselstromerzeuger höchster Frequenzkonstanz, der gleichzeitig Normalfrequenzen zu liefern und einen mit einer Kontaktvorrichtung zum Abteilen von Zeitintervallen oder mit einem Zeigerwerk zur Zeitangabe versehenen Synchronmotor zu treiben vermag. Ihren Namen hat die Quarzuhr von dem bei ihr als Steuerorgan verwendeten Quarzstab erhalten. Die Quarzuhr ist den astronomischen Pendeluhrn sowohl hinsichtlich kurzfristiger Gangkonstanz über Stunden, Tage und Monate, als auch hinsichtlich langzeitiger über Jahre überlegen. (Über Stand und Gang einer Uhr s. ATM-Blatt V 142-1.)

Der Quarzstab steuert die Quarzuhr nicht nach Art eines Uhrenpendels, wodurch seine Schwingungsdauer durch die Erdbeschleunigung maßgebend bestimmt sein würde, sondern als elastisch freischwingender Körper, dessen Schwingungsdauer allein von Stablänge, Elastizitätsmodul und Dichte abhängt. Die Anregung des Quarzstabes zu einer elastischen Eigenschwingung, beispielsweise der zweiten longitudinalen Eigenschwingung in Richtung der Stabachse, geschieht auf piezoelektrischem Wege mittels des „reziproken Piezoeffektes“. Dieser Effekt besagt, daß ein zu den piezoelektrischen Kristallen gehörender Körper periodische Dehnungen und Zusammenziehungen in bestimmten Richtungen erfährt, wenn er in bestimmter Weise einem elektrischen Wechselfeld ausgesetzt ist. Die Amplitude dieser elastischen Deformation bzw. elastischen Schwingung erreicht ihr Maximum, wenn die Frequenz des erregenden elektrischen Wechselfeldes in Resonanz mit einer elastischen Eigenschwingung des Quarzstabes ist. In der Quarzuhr liefert der Quarzstab das zu seiner Anregung nötige elektrische Wechselfeld über eine Verstärkerröhren-Schaltung in Rückkopplung sich selbst.

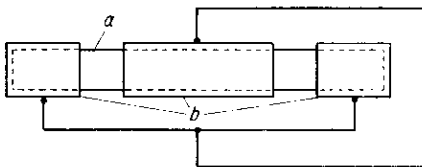


Bild 1. Steuerquarz und Anregungselektroden.

Bild 1 zeigt schematisch einen in den Quarzuhren nach Scheibe und Adelsberger verwendeten Steuerquarz *a* nebst Schaltung der Anregungselektroden *b*. Die Elektroden umhüllen kastenförmig den quadratischen Quarzstab, dessen wirksame piezoelektrische Achse

bei dem hier gewählten Quarzschnitt mit der Stabachse und damit auch mit der Schwingungsrichtung der Longitudinalschwingung zusammenfällt. Die beiden äußeren Elektroden sind parallelgeschaltet. Infolge dieser Schaltung erregt sich die zweite longitudinale Eigenschwingung.

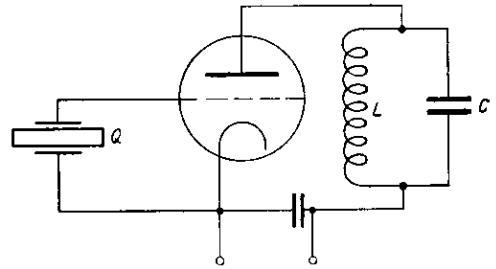


Bild 2. Steuerquarz in Pierce-Schaltung.

Bild 2 zeigt die meistverwendete Selbsterregungsschaltung nach Pierce. Der Quarzstab liegt mit seinen Elektroden zwischen Gitter und Kathode der Verstärkerröhre geschaltet. Der aus Induktivität *L* und Kapazität *C* gebildete Anodenkreis der Röhre ist auf eine Frequenz abgestimmt, die größer als die anzuregende Eigenfrequenz des Quarzstabes zu sein hat. Die Röhrenschaltung erregt sich über die Gitter-Anodenkapazität der Röhre als Rückkopplungsorgan in einer elektrischen Frequenz, die der elastischen Eigenfrequenz des Quarzstabes nahezu gleichkommt.

Der Scheitelwert des von und in der Röhrenschaltung, dem sog. Steuersender, erzeugten hochfrequenten Wechselstromes wird aus Gründen der Unbeeinflussbarkeit des Frequenzwertes durch die Schaltelemente selbst mittels schwächster Rückkopplung künstlich so klein als möglich gehalten. Zur Weiterverwendung dieses Wechselstromes ist daher eine Amplitudenerhöhung in mehreren, rückwirkungsfrei an den Steuersender angekoppelten Verstärkerstufen erforderlich. Aber auch nach Durchlaufen dieser Verstärker ist der Wechselstrom infolge seiner hohen Frequenz, die bei den Quarzuhren nach Scheibe und Adelsberger 60000 Hz, bei anderen Konstruktionen 100000 Hz beträgt, zur Abgabe von Zeitintervallen noch nicht verwendungsfähig. Um einen Synchronmotor, der Zeitintervalle von Sekundendauer zu liefern oder ein Uhrzeigerwerk zur Zeitangabe zu treiben vermag, bewegen zu können, ist eine Herabsetzung der Hochfrequenz auf Beträge von 1000 Hz oder weniger notwendig.

Die Frequenzherabsetzung geschieht in Frequenzteilerstufen derart, daß, beispielsweise bei den Quarz-

uhren nach Scheibe und Adelsberger, zuerst ein kleiner Röhrensender von 10000 Hz und über diesen ein weiterer von 1000 Hz und dann ein solcher von 250 Hz synchron von der ursprünglichen Hochfrequenz 60000 Hz gesteuert wird. Der Synchronismus bedeutet, daß die Frequenzteilung im Verhältnis ganzer Zahlen, im vorliegenden Falle wie 1:240 erfolgt. (Bei der Konstruktion von Rohde und Leonhardt steuert die Hochfrequenz von 100000 Hz zwecks Teilung einen Stimmgabelsender von 1000 Hz.) Der so erzeugte niederfrequente Wechselstrom vermag dann entweder unmittelbar von der letzten Teilerstufe aus oder über einen zusätzlichen Verstärker den Synchronmotor zu treiben.

Daraus ergibt sich für das Zeitintervall T einer Umdrehung der Motorachse:

$$T = \frac{u \cdot p}{F} \text{ s} \quad (2)$$

p ist stets ganzzahlig, u wird praktisch meist ganzzahlig gewählt; T kann durch passende Wahl von F in ein bequemes ganzzahliges Verhältnis zur Zeiteinheit 1 s gebracht werden. Dieser Sollwert der Frequenz sei mit F_0 bezeichnet. Es ergibt sich beispielsweise bei $F_0 = 60000$ Hz, $u = 240$ und $p = 50$ das Zeitintervall T zu 0,2 s. Durch Hinzufügung weiterer Drehachsen mit passend gewählten Untersetzungsgetrieben läßt sich weiterhin das von dem Synchronmotor abzugebende Zeitintervall auf den Wert von 1 s selbst oder, je nach den Erfordernissen der Zeitmessung, auf beliebige Vielfache davon einstellen.

Im folgenden soll stets angenommen werden, daß die Kontakteinrichtung des Synchronmotors das Zeitintervall $T = 1$ s liefert. Dabei entspricht dieses Zeitintervall dem absoluten Wert von 1 s jedoch nur insoweit, als die Abgleichung der Frequenz F auf den Sollwert F_0 entsprechend der Beziehung (2) gelungen ist.

Die Abgleichung des Steuerquarzes auf die Sollfrequenz F_0 geschieht zuerst einmal durch vorsichtiges Abschleifen der Stablänge. Man erreicht dabei bestenfalls Werte von T , die noch immer um einige Hundertmillionstel Sekunden vom Sollwert 1 s abweichen. Eine noch bessere Abgleichung von F ist dann nur noch auf elektrischem Wege unter Ausnutzung der Tatsache möglich, daß die Frequenz eines Steuerquarzes in geringem Maße durch die elektrischen Daten des Stuersenders, wie Anodenspannung, Heizfadenspannung oder Kapazität der Röhrenelektroden einflußbar ist. Durch diese Methode läßt sich die Abweichung des Zeitintervalles T vom Sollwert 1 s zu Null machen.

Im allgemeinen kann man jedoch mit einer geringen Abweichung ΔT vom Sollwert 1 s vorliebnehmen, da dadurch die Verwendbarkeit der Quarzuhr für genaueste Zeitmessungen in keiner Weise eingeschränkt wird. Die Abweichung der Frequenz F von dem nach (2) gegebenen Wert F_0 sei mit ΔF bezeichnet, dann ergibt sich für den Fehler des Zeitintervalles und der Frequenz

$$\Delta T = - \frac{\Delta F}{F_0} \cdot T; \quad (3a)$$

$$\Delta F = F - F_0 \quad (3b)$$

es sei z. B. $F = 60000,006$ Hz, also $\Delta F = +0,006$ Hz, dann ist $\Delta T = -0,0000001$ s.

Der tägliche Gang g und der Stand U der Quarzuhr.

Der Betrag ΔT ist nach dem Vorhergesagten sehr klein und spielt bei vielen, insbesondere kurzdauernden Zeitmessungen kaum eine ins Gewicht fallende Rolle. Er ist von wesentlicher Bedeutung jedoch dann, wenn die Quarzuhr als Zeitnormal zur Angabe von Zeitständen, also zur wahren Zeitbestimmung oder als Frequenznormal zur Lieferung von Normalfrequenzen Verwendung finden soll.

Der mittlere Sonnentag hat eine Zeitdauer von 86400 mittleren Sekunden. Das Produkt

$$g = 86400 \cdot \Delta T \quad (4)$$

gibt dann den Wert an, um den die Quarzuhr im Laufe von 24 h voreilt oder nachgeht, je nachdem g negativ

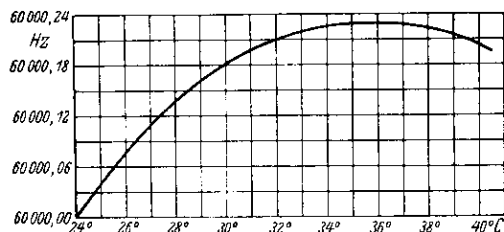


Bild 3. Temperaturabhängigkeit der Frequenz.

Die Frequenz der Eigenschwingung des Steuerquarzes ist im allgemeinen nicht temperaturunabhängig. Bild 3 zeigt den Frequenzgang des Steuerquarzes nach Scheibe und Adelsberger. Die Temperaturunabhängigkeit ist nur in einem kleinen Temperaturbereich bei 36° C vorhanden. Daher ist der Steuerquarz in einem Thermostaten untergebracht, der den Quarz auf günstigster Temperatur zu halten hat. Diese Arbeitstemperatur ist eine Funktion des Kristallschnittes und der Gestalt des Steuerquarzes, so daß dadurch größere Unterschiede im Aufbau der Thermostaten bedingt sein können.

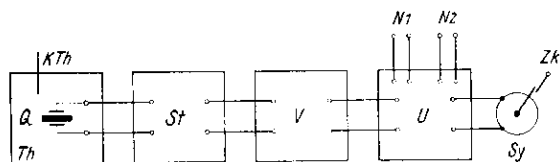


Bild 4. Grund-Aufbau einer Quarzuhr.

Bild 4 zeigt endlich in Zusammenfassung des bisher Beschriebenen schematisch den Aufbau der Quarzuhr aus ihren wesentlichen Teilen: Quarzstab Q im Thermostaten Th mit Umschaltthermometer kTh , Stuersender St , Verstärker V , Frequenzteilerstufen U und Synchronmotor Sy .

Synchronmotor und Zeitintervall T . Die sekundliche Drehzahl n des Synchronmotors steht zur Frequenz f der letzten Teilerstufe, zur Frequenz F des Steuerquarzes, zum Gesamtteilungsfaktor u und zur Polpaarzahl p des Motors in der Beziehung

$$n = \frac{f}{p} = \frac{F}{u \cdot p} \quad (1)$$

oder positiv ist. g wird als der tägliche Gang der Quarzuhr bezeichnet. Bei negativem g ist T kürzer, bei positivem g ist T länger als 1 s; im ersten Fall dreht sich der Synchronmotor zu schnell, im zweiten Fall zu langsam.

Der Gang g bedingt, daß die Zeitangabe einer mit Zifferblatt und Zeigerwerk ausgerüsteten Quarzuhr dem absoluten Werte nach nicht mit der gleichzeitigen Zeitangabe des mittleren Sonnentages übereinstimmt, wenn man Tag für Tag die Zeitbestimmung durchführt. Bezeichnet man die Zeitangabe des mittleren Sonnentages als die wahre Zeit, so nennt man die Differenz: wahre Zeit — Zeitangabe der Quarzuhr den Uhrstand oder Stand U . Der Wert von U ist der Zeitangabe der Quarzuhr hinzuzuzählen, um die wahre Zeit zu erhalten.

Der tägliche Gang g ergibt sich als die Differenz der Stände U an zwei aufeinander folgenden Tagen, die zur gleichen wahren Zeit gemessen wurden:

$$g = U_2 - U_1 \quad (5)$$

Weder der Stand U noch der tägliche Gang g sind ein Maß für die Güte der Quarzuhr. Beide müssen auf jeden Fall gemessen und dauernd nachkontrolliert werden; es ist daher gleichgültig, ob bei der Messung diese beiden Größen den Wert Null haben oder nicht. Nur für die bequeme Handhabung der Quarzuhr, insbesondere für die Verwendung zur Zeitangabe sind zu große Werte von U bzw. g etwas unerwünscht.

Wichtig ist allein das Verhalten des Ganges g in Abhängigkeit von der Zeit. Es ist von vornherein nicht anzunehmen, daß g völlig konstant ist. Da g über (4) nach (3) allein eine Funktion der Frequenz F ist, so ist g gleichfalls von sämtlichen Größen abhängig, durch die die Frequenz beeinflußt wird.

Die Frequenz F und damit der Gang g werden außer durch den Alterungszustand des Quarzes selbst noch von folgenden Größen beeinflußt: Anodenspannung und Heizfadenspannung des Steuersenders, Schaltungselemente des Anodenkreises, Kapazitäten der Röhrenelektroden, Rückkopplungsfaktor, Temperatur des Steuerquarzes, Halterungsart und Abstand der Anregungselektroden des Quarzstabes und Kopplungsgrad zwischen Steuersender und Verstärker.

Der Quarzuhrenkonstrukteur sucht durch geeignete Schaltungsmaßnahmen die Summe sämtlicher Einflüsse so klein als möglich zu machen. Die praktischen Erfahrungen haben trotzdem gezeigt, daß geringe Änderungen von g mit der Zeit übrigbleiben. Die zeitliche Abhängigkeit von g läßt sich innerhalb eines mehr oder weniger großen Zeitintervalles meist durch eine lineare Gleichung der Form

$$g_t = g_0 + \Delta g \cdot t \pm \delta g \quad (6)$$

darstellen, worin g_0 den Anfangsgang, Δg die tägliche Gangänderung und δg die zufällige tägliche Gangschwankung, die durch unkontrollierbare Einflüsse, z. B. durch Meßfehler oder durch spontane Schwankungen einer der obengenannten Einflußgrößen bedingt sind, bedeuten.

g_0 und δg sind von geringerer Wichtigkeit als die tägliche Gangänderung Δg . Vorausgreifend kann über Δg gesagt werden, daß es eine, jeder einzelnen Quarzuhr

eigene Größe ist, die besonders bei frisch eingeschalteten Quarzuhren sich anfänglich von Tag zu Tag stark ändert, um dann allmählich auf einen über lange Zeiträume konstanten Betrag abzusinken. Dieses „Einklaufen“ von Δg wird (etwas schlagwortähnlich) auf eine „Alterung“ des Steuerquarzes zurückgeführt.

Die Quarzuhr retardiert oder verzögert sich, wenn Δg ein positives Vorzeichen hat; sie akzeleriert oder beschleunigt sich bei negativem Vorzeichen.

Es ist eine Hauptaufgabe der Überwachung einer Quarzuhr, die einzelnen Glieder der rechten Seite der Gl. (6) zu bestimmen, da sonst eine Ausschöpfung der Quarzuhr als Zeit- und Frequenznormal unmöglich ist.

Die Normalfrequenz F_0 der Quarzuhr. Das Getriebe am Synchronmotor, das die im allgemeinen zu hohe Umdrehungsgeschwindigkeit der Motorachse so verlangsamt, daß das von der Zeitachse gelieferte Zeitintervall $T = 1$ s ist, möge das Untersetzungsverhältnis m haben, dann wird aus (2)

$$T = 1 = \frac{u \cdot p \cdot m}{F_0} \quad (7)$$

Für die tägl. Frequenzabweichung $\Delta_t F$ der Frequenz F des Steuerquarzes vom Sollwert F_0 ergibt sich über (3) und (4)

$$\Delta_t F = -g_t \cdot \frac{u \cdot p \cdot m}{86400} = -g_t \cdot C, \quad (8)$$

woraus in sinnemäßer Aufteilung nach (6)

$$\Delta_t F = \Delta_0 F + A(\Delta F) \cdot t \pm \delta(\Delta F) \\ = (g_0 + \Delta g \cdot t \pm \delta g) \cdot C \quad (9)$$

folgt. Der Frequenzverlauf ist damit den Einzelgliedern des täglichen Ganges g_t identisch zugeordnet. Da der Faktor C eindeutig bekannt ist, so ergibt sich die Frequenz F_t über (8) und (3b) in einfacher Weise aus der Messung von g_t . Die Genauigkeit, mit der auf diese Weise F_t bestimmt werden kann, kommt auch den von ihr gesteuerten Unterfrequenzen der Frequenzteilstufen zu, die damit gleichfalls den Rang einer Normalfrequenz haben.

Die „momentane“ tägliche Gangänderung $\Delta \gamma$. Die Tatsache, daß der tägliche Gang g durch den Wert der Normalfrequenzen der Quarzuhr bestimmt ist, bietet die Möglichkeit, die Gänge mehrerer Uhren hochfrequenzmäßig durch die Messung von Schwebungsfrequenzen miteinander zu vergleichen bzw. laufend zu überwachen. Änderungen von g_t sind als Änderungen von F zu erkennen.

Für die Differenz γ der Gänge zweier Uhren, denen man die Kennzeichen ' und '' zuteilt, ergibt sich aus (3)

$$\gamma = (g' - g'') = - \left(\frac{\Delta F'}{F'} - \frac{\Delta F''}{F''} \right) \cdot 86400 \quad (10)$$

daraus wird, da stets $F' \approx F'' \approx F_0$ ist:

$$\gamma = -(\Delta F' - \Delta F'') \cdot \frac{86400}{F_0} \quad (11)$$

Es ist nun mit hochfrequenzmäßigen Mitteln möglich, die Schwebungsdifferenz $(\Delta F' - \Delta F'')$ innerhalb kürzester Meßzeiten (in Minuten und weniger) sehr genau zu messen. Die so gemessene Gangdifferenz γ wird daher als „momentane“ tägliche Gangdifferenz bezeichnet. Die Schwankung dieser Größe $\Delta \gamma$, die sich

beispielsweise bei zwei zeitlich auseinanderliegenden Messungen der momentanen Gangdifferenz ergibt, heißt die „momentane“ tägliche Gangänderung. In der Möglichkeit, diese beiden Momentangrößen messen zu können, liegt der große Vorrang der Quarzuhren vor den astronomischen Pendeluhrn mitbegründet.

Die momentane tägliche Gangänderung $\Delta\gamma$ gibt den Betrag an, um den die eine Uhr gegen die andere Quarz- uhr ihren täglichen Gang ändern, d. h. um den sie ihren Stand verschieben würde, falls die Ursache, die zur Änderung von F geführt hat, 24 h bestehen bliebe. Fortlaufende Bestimmungen von $\Delta\gamma$ lassen daher einen lückenlosen Überblick über das augenblickliche Verhalten zweier Quarzuhren zu. Sie gestatten in vielen Fällen durch Vergleich von mehr als 2 Uhren bei Gangstörungen das hierzu Anlaß gebende Exemplar ausfindig zu machen, so daß die Ursachen entweder beseitigt oder ihr Effekt bei Zeitbestimmungen berücksichtigt werden kann.

Der mittlere tägliche Gang $\bar{G}_{n,t}$ und die mittlere Frequenzabweichung $\Delta_t F$. Zur Bestimmung des täglichen Ganges g_t nach (5) ist eine Uhr erforderlich, die die wahre Zeit angibt. Eine solche Uhr steht nur den astronomischen Zeitinstituten in Form der Zeitsterne als Zeitpunkte zur Verfügung. Andere Besitzer von Quarzuhren können Standbestimmungen der Quarzuhren höchstens durch Anschluß der Quarzuhren an das Nauener Koinzidenzsignal um 13^h1^m vornehmen. Der so bestimmte tägliche Gang ist, da die Zeitangabe des Zeitzeichens selbst einen Fehler besitzt, mit diesem Fehler behaftet. Dieser Fehler muß bei hohen Genauigkeitsansprüchen durch Anbringung der von den astronomischen Zeitinstituten mitgeteilten „Verbesserungen“ $S_{z,t}$ beseitigt werden. Man erhält dadurch einen korrigierten täglichen Gang G_t , der sich zu

$G_t = g_t + (S_{z,2} - S_{z,1}) = U_2 - U_1 + (S_{z,2} - S_{z,1})$ (12) ergibt. $S_{z,2}$ und $S_{z,1}$ sind die Verbesserungen des Zeitzeichens am 2. bzw. 1. Meßtage.

Im Hinblick auf die mit Quarzuhren erreichbaren hohen Konstanz des Ganges ist der Wert $S_{z,t}$ wiederum selbst als erheblich falsch anzusehen. Die Bestimmung eines täglichen Ganges aus Zeitanschlüssen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen würde daher einen zu fehlerhaften Gang ergeben. Zur Verringerung dieses Fehlers ist es zweckhaft, aus einer Reihenfolge von $n + 1$ täglichen Anschlüssen einen mittleren täglichen Gang \bar{G}_n gemäß Formel

$$\bar{G}_n = \frac{1}{n} \left[\sum_{t=1}^{t=n} g_t + (S_{z,n} - S_{z,0}) \right] \quad (13)$$

abzuleiten. (Man numeriert den 1. Meßtag mit 0, den letzten mit n .)

Es ergibt sich dann analog zu (6) eine ausgeglichene Gangformel

$$\bar{G}_{n,t} = \bar{G}_{n,0} + \overline{\Delta G} \cdot t \pm \delta G; \quad (14)$$

entsprechend erhält man aus (8) die mittlere tägliche Frequenzabweichung als

$$\overline{\Delta_t F} = -\bar{G}_{n,t} \cdot \frac{u \cdot p \cdot m}{86400} = -\bar{G}_{n,t} \cdot C \quad (15)$$

Die Mittelwerte $\bar{G}_{n,t}$ und $\overline{\Delta_t F}$, wobei sich über (3b) aus letzterem der mittlere tägliche Frequenzwert \bar{F}_t zu $F_0 - \overline{\Delta_t F}$ berechnet, geben das wahre Verhalten einer Quarzuhr richtiger als die eintägigen Werte g_t und $\Delta_t F$ wieder. Insbesondere werden durch Bildung der mittleren Werte die Beträge der zufälligen täglichen Gangschwankung $\pm \delta g$ auf ein für die Beurteilung der Güte der Quarzuhr angemesseneres Maß $\pm \delta G$ herabgesetzt, da der durch Meßfehler bedingte Anteil von δg im allgemeinen die mittlere tägliche Gangänderung $\overline{\Delta G}$ erheblich übersteigen kann.

Der Uhrstand U_t . Die hohe Gangkonstanz der Quarzuhren von Scheibe und Adelsberger gestattet eine Extrapolation der Gänge und auch der Uhrstände über das zwischen $n + 1$ Zeitanschlüssen liegende Zeitintervall hinaus. Die Berechnung von $\bar{G}_{n,t}$ erfolgt nach (14). Für die Uhrstände ergibt sich daraus die Standformel

$$U_t = U_0 + \bar{G}_{n,0} \cdot t + \frac{1}{2} \overline{\Delta G} \cdot t^2, \quad (16)$$

wenn der Einfluß von δG vernachlässigt wird. U_0 ist der Anfangsstand zur Zeit $t = 0$, sein Betrag ist für die Beurteilung der Quarzuhr belanglos. Die Einflüsse von $\bar{G}_{n,0}$ und $\overline{\Delta G}$ auf U_t lassen sich an einem Zahlenbeispiel am bequemsten übersehen.

Zahlentafel 1.

Einzelglieder	Anzahl der Tage (= t)		
	10	30	90
$\bar{G}_{n,0} \cdot t$	0,100 s	0,300 s	0,900 s
$\frac{1}{2} \overline{\Delta G} \cdot t^2$	0,005 s	0,045 s	0,405 s
U_t	0,105 s	0,345 s	1,305 s

Es sei $U_0 = 0$, $\bar{G}_{n,0} = 0,01$ s/d und $\overline{\Delta G} = 0,0001$ s/d², dann ergeben sich für eine Zeit von $t = 20, 30$ oder 90 Tage die in Zahlentafel 1 verzeichneten Beträge der Einzelglieder von (16).

Schrifttum.

1. A. Scheibe, Piezoelektrizität des Quarzes, Dresden, Th. Steinkopff 1938.
2. A. Scheibe, Genaue Zeitmessung, Ergebn. exakt. Naturw. XV, Berlin, J. Springer 1936.
3. A. Scheibe und U. Adelsberger, Frequenz und Gang der Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Ann. Phys. 18 (1933), S. 1...25.
4. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Die technischen Einrichtungen der Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Z. Hochfrequenztechn. und Elektroak. 43 (1934), S. 37...47.
5. L. Rohde und R. Leonhardt, Quarzuhr und Normalfrequenz-Generator, ENT 17 (1940), S. 117...124.

Auch die Quarzuhren bedürfen der regelmäßigen Überwachung ihrer Gangleistung, wobei unter Überwachung

1. die regelmäßige Absolutmessung des Standes U , des täglichen Ganges G_t bzw. des mittleren täglichen Ganges \bar{G}_n (vgl. ATM-Blatt J 153-1) und
2. die regelmäßige Bestimmung der „momentanen“ Gangdifferenz γ bzw. ihrer Änderung $\Delta\gamma$

zu verstehen sind.

Der Grad der Genauigkeit, mit dem diese Messungen ausgeführt werden müssen, insbesondere derjenige der Absolutmessung wird jedoch je nach der Gangkonstanz oder je nach dem Verwendungszweck der Quarzuhr verschieden sein können. Quarzuhren, die als Hauptuhren in Forschungsinstituten oder astronomischen Zeitinstituten in ihrer Gangleistung bis aufs letzte ausgeschöpft werden sollen, unterliegen daher auch den genauesten Messungen.

Die bei der Überwachung angewandten Meßmethoden sind jedoch sehr einfach, lassen sich weitgehend automatisieren und können meist von Hilfskräften durchgeführt werden. In den folgenden Ausführungen wird von vornherein unterstellt, daß die Quarzuhr von der Güte einer Quarzuhr der Physikal. Techn. Reichsanstalt sei und daß höchste Ansprüche an die Genauigkeit gestellt werden. Bei geringeren Ansprüchen lassen sich die Verfahren dann von selbst leicht vereinfachen und die erforderlichen Meßzeiten verkürzen.

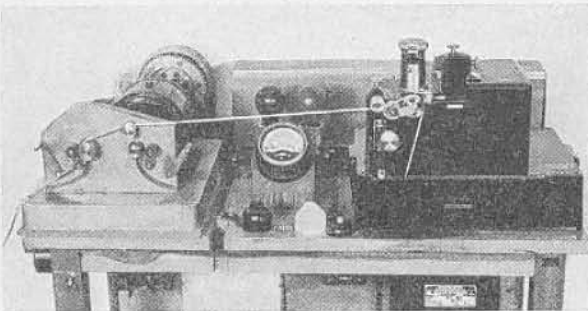


Bild 1. Drehspulnellschreiber.

Die Absolutmessung des Uhrstandes U .

Zu dieser Messung bedarf es des Vorhandenseins eines Normal der wahren Zeit. Für den Absolutanschluß von Quarzuhren, die nicht in astronomischen Zeitinstituten aufgestellt sind, steht als wahre Zeit die Zeitangabe eines der staatlichen Zeitzeichen, für Deutschland das von der Deutschen Seewarte über den Sender Nauen auf Welle 18130 m ausgestrahlte, als Strichsignal gegebene Koinzidenzsignal zur Ver-

fügung. Es beginnt um $13^h 0^m 30,5^s$ und dauert bis $13^h 6^m 0^s$ MEZ (ATM V 142-1); um $13^h 1^m 0^s$ erfolgt der Einsatz des ersten, gegenüber den anderen Koinzidenzstrichen etwas längeren Minutenstriches. Dieser Einsatz wird zweckmäßig als Bezugszeitpunkt der wahren Zeit genommen. Die Intervalllänge von Strichanfang zu Strichanfang eines jeden Koinzidenzzeichens beträgt genau $60/61$ s, womit für die verschiedensten Meßzwecke ein Zeitmaßstab zur Verfügung gestellt wird.

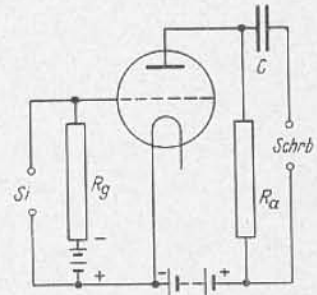


Bild 2. Röhrenrelais für Impulse.

Aufgabe der Absolutmessung ist es, den Zeitabstand x_0 (Bild 4) zwischen dem nach Quarzuhrzeit nominell um $13^h 1^m 0^s$ erfolgenden Sekundensignal $Q-S$ (Synchronmotor-Kontakt) und dem zur wahren Zeit $13^h 1^m 0^s$ MEZ ausgestrahlten Bezugszeitpunkt $Ko-Z$ des Koinzidenzsignales zu ermitteln. Bei der verlangten hohen Meßgenauigkeit kommt im allgemeinen nur ein objektives Meßverfahren zur Anwendung in Frage. Als sehr einfach und doch sehr genau hat sich das Aufschreiben der Signale von Zeitzeichen und Quarzuhr mittels Drehspulnellschreibers (Bild 1, rechts) mit nur einer Schreibfeder auf einem laufenden Papierband bewährt.

Zum Empfang des Koinzidenzsignales wird ein auf die Welle 18130 m abstimbarer Empfänger (Bild 3, mit Hochfrequenzverstärker HV , Überlagerer \bar{U})

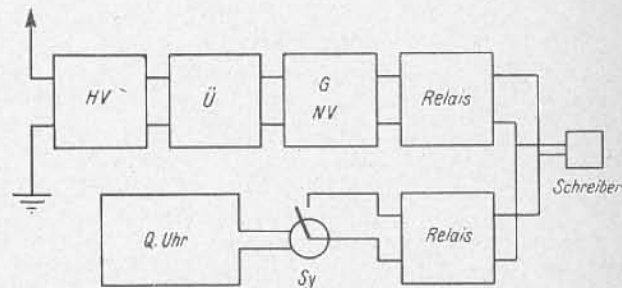


Bild 3. Aufnahmeapparatur.

Gleichrichter G und Niederfrequenzverstärker NV benötigt. Die Sendung ist unmoduliert; durch Zusatz der Überlagerungsfrequenz und nachfolgender Gleichrichtung werden die sonst unhörbaren Zeitstriche in Tonsignale gleicher Zeitlänge umgewandelt. Diese Tonsignale und die Sekundensignale (Kontaktimpulse) der Quarzuhr werden der Drehspule des Schreibers zugeleitet.

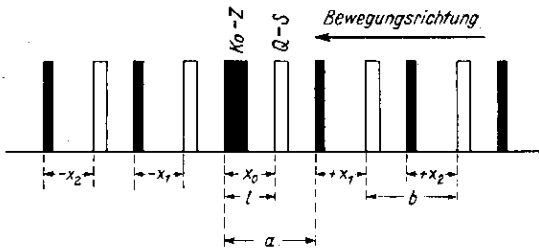


Bild 4. Maßstreifen.

Die Schreibfeder, beim Drehspulnschnellschreiber von S. & H. (Bild 1) ein Schreibröhrchen, schreibt bei Stromlosigkeit der Drehspule auf dem Papierband einen fortlaufenden Längsstrich; bei Stromfluß durch die Drehspule erfolgt die Ablenkung der Feder seitwärts aus der Nullage heraus. Zur Zeitauswertung des Signals ist die genaue Ausmessung des Einsatzes der Ablenkung erforderlich. Zur scharfen Markierung dieser Stelle in dem Tintenstrich der Feder und damit zur Erzielung einer hohen Ablesegenauigkeit ist es nötig, die Ablenkung mit großer Geschwindigkeit erfolgen zu lassen. Dies geschieht durch Auslösung sehr kräftiger Kondensatorentladungen über je ein Röhrenrelais seitens der beiden Zeitsignale, wodurch kurzzeitig ein weitaus stärkerer Strom in Form eines Stromstoßes durch die Drehspule fließt, als dauerstrommäßig erlaubt ist.

Das Röhrenrelais (Bild 2) ist bei fehlendem Signal durch geeignete negative Gitterspannung gesperrt, so daß kein Anodenstrom durch die im Anodenkreis liegende Drehspule des Schnellschreibers fließen kann. Der Anodenkondensator C ist bei Sperrung über den Ladewiderstand R_0 entladen. Das am Gitter der Röhre ankommende Signal hebt momentan die Sperrung auf, so daß ein in den Kondensator fließender Stromimpuls die Drehspule betätigt. Die Aufhebung der Sperrung erfolgt seitens des ankommenden Tonsignales des Zeitzeichens (K_0-Z) durch die erste positive Halbwelle des Tones, deren Spannungsbetrag die negative Gitterspannung am Gitterwiderstand R_0 kompensiert, seitens des Kontaktsignales der Quarzuhr ($Q-S$) durch Ableitung des Gitters nach Kathode über den mechanischen Kontakt des Synchronmotors Sy (vgl. Bild 3).

Bild 3 zeigt schematisch die Anordnung der Aufnahme- und Schreibapparatur.

Bild 4 zeigt einen Ausschnitt (schematisch) aus einem Maßstreifen beiderseits des Bezugszeitpunktes $13^h 1^m 0^s$ MEZ. Die Länge l ist ein Maß für den zeitlichen Abstand des Quarzuhren-Signals von der wahren Zeit. Sie ist auszumessen und in Sekunden ($= x_0$) umzurechnen. Scheibe und Adelsberger verfahren hierbei so, daß sie dem Papierstreifen durch den von der Quarzuhr selbst über einen Synchronmotor ge-

steuerten Streifenzugmotor die Geschwindigkeit 100 mm/s geben. Ist l der Zeitabstand in mm, so ergibt er sich in Sekunden zu $x_0 = \frac{l}{100}$. Steht ein Synchronmotor zur exakten Steuerung der Streifengeschwindigkeit nicht zur Verfügung, so ermittelt man die Geschwindigkeit aus dem Abstand a zweier beiderseits des Quarzuhrensignales liegenden Koinzidenzsignale K_0-Z , der zeitlich gleich $60/61$ s ist. Der Zeitabstand ergibt sich dann zu $x_0 = \frac{60}{61} \cdot \frac{l}{a}$ s. An Stelle dieser Maßlänge $60/61$ kann infolge des geringen Betrages von ΔT (ATM-Blatt J 153-1) auch der Längenabstand b zweier Quarzuhrensingale selbst als Maßstab für 1 Sekunde benutzt werden, so daß $x_0 = 1 \cdot \frac{l}{b}$ s ist.

Der gemessene Wert von x_0 ist positiv zu setzen, wenn das Sekundenzeichen ($Q-S$) der Quarzuhr zeitlich nach dem Bezugszeitpunkt, er ist negativ zu setzen, wenn es vor dem Bezugszeitpunkt aufgeschrieben wird. Der Uhrstand U der Uhr ist dann gleich x_0 .

Der Fehler des Standes U .

Die Genauigkeit, mit der U bestimmbar ist, entspricht derjenigen, mit der die Längen l , a und b gemessen werden können. Die Längenmessung geschieht vorteilhaft mittels eines in mm geteilten Glasmaßstabes, dessen Strichteilung parallaxenfrei auf dem Maßstreifen aufgelegt werden kann, wobei die Zehntelmillimeter geschätzt werden müssen. Bei rechtwinkliger Ablenkung der Schreibfeder aus der Nullage heraus — dies ist mittels der oben beschriebenen Apparatur (Bild 2) durchaus möglich — kann die Einsatzstelle des Zeichens auf etwa ein Zehntelmillimeter genau abgelesen werden. Bei einer Streifengeschwindigkeit von 100 mm/s entspricht 0,1 mm einem Zeitabstand von 0,001 s; der Ausmeßfehler α einer Einsatzstelle beträgt demnach etwa $\pm 0,001$ s. Die Längen l , a und b sind dann bis auf $\pm 0,002$ s richtig. Das Verfahren von Scheibe und Adelsberger erfordert nur eine einzige Längenmessung l , der Meßfehler σ des Standes U beträgt in diesem Falle allein $\pm 0,002$ s. Ist als weitere Längenmessung noch die der Länge a oder b erforderlich, so erhöht sich der Fehler σ des Standes auf maximal $\pm 0,004$ s; im allgemeinen wird σ etwas kleiner sein.

Zu dem Meßfehler σ kommt noch der durch Schwankungen bedingte Einsatzfehler ϵ des Signales hinzu, der bei den Quarzuhren in Ungenauigkeiten des Sekundenkontaktes, bei dem Zeitzeichen im Steuer- und Aussendemechanismus zu suchen ist. Es bedeutet keine Schwierigkeit, den Kontaktfehler der Quarzuhr auf 0,0001 s und weniger zu begrenzen. Der Einsatzfehler ϵ des Koinzidenzzeichens liegt etwa bei $\pm 0,001$ s und erhöht somit den Gesamtfehler des Standes U kaum.

Es ist zwecks Verringerung der Meßfehler empfehlenswert, nicht nur einen Zeitabstand x_0 , sondern eine weitere Anzahl von Abständen $+x_1$, $+x_2$... und $-x_1$, $-x_2$... auszuwerten, die symmetrisch beiderseits des Bezugszeitpunktes liegen. Hilfszeitpunkte sind hierbei die in der Nähe liegenden Koinzidenzzeichen, deren zeitlicher Abstand vom Bezugszeitpunkt ein Vielfaches von $60/61$ s ist. Die Mittelung von x ergibt einen mittleren Wert für U .

Die Korrektur des Standes U .

Infolge des Absolutfehlers des Zeitzeichens ist der Stand U um den von den Zeitinstituten ermittelten Verbesserungswert $S_{z,n}$ zu verbessern. Der wahre Stand ist gleich $U + S_{z,n}$. Die Verbesserungen $S_{z,n}$ haben Beträge bis zu plus oder minus mehreren Hundertstel Sekunden und werden von den einzelnen Zeitinstituten für den gleichen Zeitpunkt unter Umständen bis zu einigen Hundertstel Sekunden (Fehler ζ) verschieden angegeben.

Der unverbesserte Stand U ist daher je nach Zeitinstitut um mehrere Hundertstel Sekunden falsch. Auch nach Anbringung des Mittels aus den Verbesserungen beider Zeitinstitute kann trotzdem der Stand noch um 0,01 bis 0,02 s (Fehler ν) unsicher sein. Diese Unsicherheit wird etwas vermindert, wenn man auch die Verbesserungen des Bureau international de l'heure in Paris und des Observatoriums zu Greenwich mit heranzieht. Leider erscheinen die Mitteilungen über die Verbesserungen, auch seitens der deutschen Institute, aus berechtigten Gründen kaum früher als 2 bis 3 Monate nach dem Aussenden des Zeitzeichens, so daß Standbestimmungen erst nach diesem Zeitpunkt endgültig fundiert sind.

Berechnung und Genauigkeit der Gänge G_t und \bar{G}_n .

Die Berechnung von G_t erfolgt zu $U_2 - U_1 + S_{z,2} - S_{z,1}$ nach (12) im ATM-Blatt J 153-1. Der Fehler λ von G_t setzt sich hauptsächlich aus der Differenz der Meßfehler σ von U und weiterhin aus der Differenz der Fehler ζ oder ν der Verbesserungen zusammen. Im ungünstigsten Falle beträgt bei einem Fehler von $\sigma = \pm 0,002$ s die Differenz etwa $\pm 0,004$ s, während z. B. die Differenz von ν nicht mit 2ν , sondern mit nur etwa $\pm 0,010$ s angesetzt zu werden braucht, da erfahrungsgemäß ein starker Anteil von ν als systematischer Fehler bei der Differenzbildung in Fortfall kommt. Der Fehler λ des täglichen Ganges G_t errechnet sich daraus mithin bei Benutzung zweier Zeitinstitute zu $\pm 0,011$ s; wenn dies auch eine Art von Maximalfehler ist, so erscheint dennoch die Bildung eines täglichen Ganges allein bei Verwendung von Quarzuhren infolge der möglichen Größe von λ als unnütz für irgendwelche Gangbetrachtungen. Zur Verminderung von λ auf einen diskutablen Betrag ist nach (13), ATM J 153-1, die Mittelbildung des Ganges über $n = 10$ Tage als $\bar{G}_{n=10}$ zum mindesten notwendig; der Fehler verkleinert sich dadurch auf etwa $\pm 0,001$ s. Eine weitere Mittelung zu $\bar{G}_{n=30}$ läßt dann mit großer Sicherheit den Fehler des Ganges infolge fehlerhafter Verbesserungen unter 0,001 s sinken. Nur über Meßreihen von 10 bis 30 Tagen kann also durch Anschluß an das Zeitzeichen ein zutreffendes Bild vom Verhalten des Ganges der Quarzuhr gewonnen werden. Die Messung der „momentanen“ Gänge hilft diesem im Zeitzeichen begründeten Mangel der Absolutmessung in der Quarzuhren-Überwachung ab.

Die Erzeugung der „momentanen“ Gangdifferenz γ .

Nach Formel (11) in ATM-Blatt J 153-1 ist γ durch die Differenz der Normalfrequenzen F' und F'' zweier Quarzuhren bestimmt. Als Normalfrequenzen können sowohl die Ausgangsfrequenz des Verstärkers V als

auch die durch Teilung entstandenen Frequenzen der Teilerstufen U dienen. Die Verwendung der 10000 Hz- oder 1000 Hz-Frequenzen hat sich in vielen Fällen als besonders praktisch erwiesen; beide Frequenzen können bequem über Postleitungen fortgeleitet werden, so daß die Überwachung der Quarzuhren weit entfernt vom Quarzuhrenraum selbst stattfinden kann.

Die Erzeugung der Frequenzdifferenz $\bar{\Delta} = \Delta F' - \Delta F''$ wird in einer Schwebungsschaltung nach Bild 5 vorgenommen. Die beiden Frequenzen werden zur Vermeidung von Rückwirkungen je einer getrennten Eingangsverstärkerröhre E_1 und E_2 zugeleitet, um dort auf einen genügend hohen Spannungswert verstärkt zu werden. In dem beiden Röhren gemeinsamen Anodenkreis fließen die Ströme beider Frequenzen, die durch den Übertrager U auf das Gitter einer Gleichrichterröhre G induzieren. Das Gitter ist soweit in den unteren Knick der Kennlinie der Röhre hinein negativ vorgespannt, daß infolge der Richtverstärkung im Widerstand R_a ein Wechselstrom der Schwebungsfrequenz $\bar{\Delta}$ fließt.

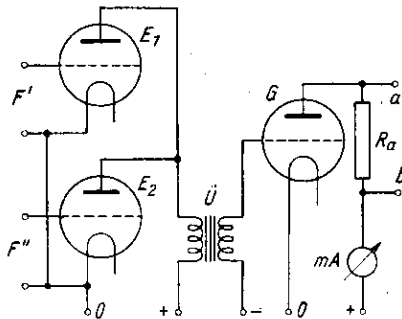


Bild 5. Schwebungserzeugung.

Die Messung der Schwebungsfrequenz $\bar{\Delta}$.

Die Frequenzen F' und F'' weichen nicht viel voneinander ab, so daß die Schwebungsfrequenz im allgemeinen die Größenordnung einiger Hz und darunter hat. Ist n die Anzahl der Schwebungen in der Zeit T , so ergibt sich die Frequenz zu

$$\bar{\Delta} = \Delta F' - \Delta F'' = \frac{n}{T} \quad (1)$$

Die Werte von n und T sind zu bestimmen.

n kann je nach Höhe der Schwebungsfrequenz und verlangter Genauigkeit durch Auszählung nach dem Gehör oder mit dem Auge, durch Registrierung mittels eines Zählwerkes oder durch Markierung auf einem Drehspulschreibers ermittelt werden. Die Zeitbestimmung erfolgt mittels Stoppuhr oder ebenfalls durch Zählwerk bzw. Schnellschreiber.

a) **Auszählung und Stoppuhr.** Man beobachtet die Durchgänge des Zeigers des im Anodenkreis des Gleich-

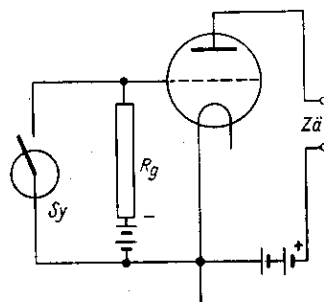


Bild 6. Röhrenrelais für Zählwerk.

richters (Bild 5) eingeschalteten Strommessers mA durch einen geeignet liegenden Teilstrich der Skala und zählt sie. Gleichzeitig stoppt man beim Durchgang $n = 0$ und n die Zeit ab. An Stelle des Strommessers kann von dem Schwebungsstrom auch ein Klopfer, z. B. ein magn. Relais zum Abhören der Schwebungszahl verwendet werden.

b) Zählwerk. Geeignet ist ein Telephonzähler, der an Stelle von R_a (Bild 5) geschaltet wird und die Zahl der durch ihn fließenden Stromimpulse zählt. Man beobachtet das Vorwärtsrücken der Zahlen des Zählers und stoppt mittels Stoppuhr die Zeit ab. Die Zeit kann jedoch auch gleichfalls durch ein Zählwerk gezählt werden, indem man dieses durch den Sekundenkontakt der Quarzuhr selbst über ein Röhrenrelais nach Bild 6 betätigen läßt. Eine vollständige, aus zwei Schwebungszählern (links und rechts im Bild) für zweimal zwei Quarzuhren und einem Zeitzähler (Mitte) bestehende Registrierapparatur nach Scheibe und Adelsberger zeigt Bild 7. Diese Apparatur ist für den Dauerbetrieb zur fortlaufenden Überwachung geeignet.

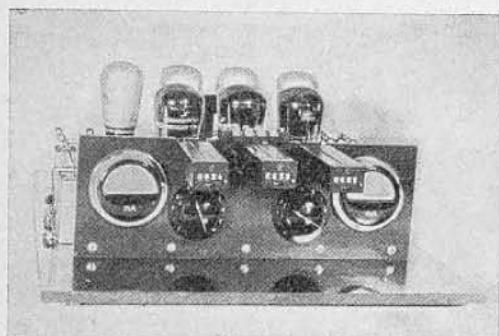


Bild 7. Schwebungszählwerke.

c) Drehspulsnellschreiber. Die Zuführung der Sekundenkontakte der Quarzuhr erfolgt wie bei der Absolutmessung des Ganges über das Röhrenrelais des Bildes 2. Die Schwebungen werden von den Klemmen a und b der Schwebungsapparatur (Bild 5) zuerst einem Verformungsverstärker (Bild 8) zugeleitet, der wie nach Bild 2 die Aufgabe hat, die sinusförmigen Schwebungen in scharfe, zur Markierung auf dem Schreibband geeignete Kondensatorentladungen umzuformen. Im Ausgang dieses Verstärkers ist die Drehspule des Schreibers (Schrb.) eingeschaltet. Das Bild des auf diese Weise beschriebenen Papierbandes gleicht dem des Bildes 4, an Stelle des K_0-Z liegt jedoch das Schwebungssignal. Die Auswertung geschieht in gleicher Weise, wie für Bild 4 beschrieben worden ist.

Die Genauigkeit bei Messung der Gangdifferenz γ .

Unter Verwendung von (1) ergibt sich für die „momentane“ Gangdifferenz

$$\gamma = -\frac{n}{T} \cdot \frac{86400}{F} \text{ s} \quad (2)$$

Es sei nun mit $2d$ der maximale Auszählfehler der Schwebungszahl n , mit 4α der Ausmeß- oder Auszählfehler der Zeitlänge T und mit δ der absolute Fehler der Sekunde des T anzeigenden Zeitnormals bezeichnet, dann gilt ungünstigst für den Fehler $\delta\gamma$ der momentanen Gangdifferenz γ

$$\delta\gamma = \pm \left[\delta + \frac{2d}{n} + \frac{4\alpha}{T} \right] \cdot \frac{n}{T} \cdot \frac{86400}{F} \text{ s} \quad (3)$$

Aus der Formel ist abzulesen, daß bei gleichem Fehlerbetrag des Klammersausdruckes und bei gleicher Frequenz F der Meßfehler $\delta\gamma$ um so kleiner wird, je kleiner die Schwebungsfrequenz $\bar{\Delta} = n/T$ ist. Praktisch treten je nach der angewandten Methode a), b) oder c) einer oder zwei der Einzelfehler des Klammersausdruckes zurück; meist kann der Fehler δ vernachlässigt werden.

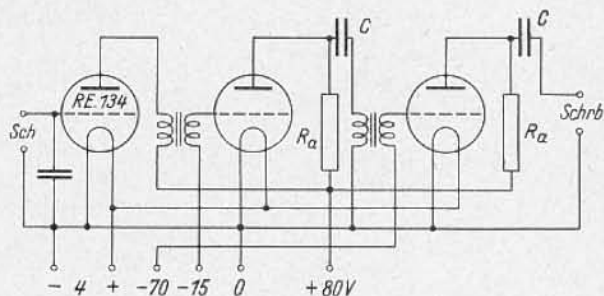


Bild 8. Schwebungsverformer.

Im einzelnen gilt über die erreichbaren Genauigkeiten folgendes:

a) Auszählung und Stoppuhr. δ ist der Fehler der Stoppuhr-Sekunde; d ist gleich 0; 2α ist die Ableseungenauigkeit der Stoppzeit. Wenn n klein genug bzw. T groß genug gewählt werden kann, sind auch mit dieser Methode gute Meßergebnisse zu erzielen.

b) Zählwerk. Es sollen die Schwebungen und die Zeit mittels der Zählwerke gezählt werden. Die Zeitziffer wird in dem Augenblick abgelesen, in dem diese Zahl sich am Zeitzähler einstellt, und gleichzeitig wird die am Schwebungszähler vorhandene zugehörige Schwebungsziffer abgelesen. Es ist δ gleich dem Fehler der Quarzuhren-Sekunde ($= \Delta T$ im ATM-Blatt J 153-1), d gleich höchstens 1 und 4α gleich der restierenden Verzögerung des Zeitzählers. Beispiel: es sei $\delta = 1 \cdot 10^{-7}$, $4\alpha = 1 \cdot 10^{-2}$ s, dann überwiegt bei einer Meßzeit von $T = 3600$ s und einer Schwebungszahl $n = 7200$, d. h. bei $\bar{\Delta} = n/T = 2$ Hz, das Glied $2d/n$ von (3) völlig und es ergibt sich bei einer Frequenz $F = 10000$ Hz

$$\delta\gamma \approx \pm 0,005 \text{ s.}$$

Dieser Meßfehler ist für Quarzuhren noch recht beträchtlich, er würde sich bei einer Zählzeit über 12 Stunden jedoch bereits auf den annehmbaren Betrag von 0,0004 s vermindern.

c) Drehspulsnellschreiber. Es möge δ wie bei b) gleich $1 \cdot 10^{-7}$ sein; d ist gleich 0, da beim Auszählen kein Irrtum möglich ist; α soll wie bei den Standmessungen gleich 0,001 s sein. Unter diesen Annahmen überwiegt das Glied $4\alpha/T$ immer noch weit das Glied δ . Bei einer Meßzeit von $T = 200$ s und einer Schwebungszahl $n = 400$, d. h. bei $\bar{\Delta} = n/T = 2$ Hz, ergibt sich für eine Frequenz $F = 10000$ Hz der Fehler der „momentanen“ Gangdifferenz zu

$$\delta\gamma \approx \pm 0,00035 \text{ s.}$$

Die Verwendung einer Schwebungsfrequenz von $\bar{\Delta} = 1$ Hz würde bei gleicher Meßdauer den berechneten Fehler halbieren.

Der Schnellschreiber wird mit großem Erfolg also dann verwandt, wenn es auf Erreichung hoher Meßgenauigkeit bei kürzester Meßzeit ankommt. Der Begriff „momentan“ hat hier seine völlige Berechtigung.

Jeder quarzgesteuerte Sender vermag unter Zwischenschaltung von Frequenzteilerstufen einen Synchronmotor zur Abgabe von Zeitkontakten zu treiben. Es wäre jedoch falsch, wollte man einen jeden mit diesen Einrichtungen versehenen Sender als „Quarzuhr“ bezeichnen. Unter „Quarzuhr“ sollte bei Einführung dieses Begriffes nur ein solcher quarzgesteuerter Sender verstanden werden, der mindestens ähnliche Gangleistungen wie die anerkannten astronomischen Pendeluhrn aufweisen könnte. An Konstruktionen so gekennzeichnete Quarzuhrn gibt es z. Z. nur die „crystal clock“ von Marrison, die Quarzuhr der PTR von Scheibe und Adelsberger, das „time standard“ von Essen und neuerdings die Quarzuhr von Rohde und Leonhardt.

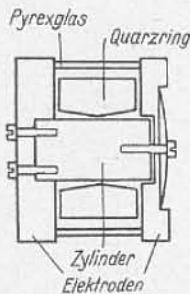


Bild 1. Ringhalterung nach Marrison.

Die „crystal clock“ von Marrison. Aufbau. Als Steuerquarz dient ein Quarzring, der so aus dem Quarzkristall herausgeschnitten ist, daß die elektrische Achse des Kristalles auf der Ringebene senkrecht steht. Die innere Ringfläche ist v-förmig zugeschliffen, so daß der Ring nur mit einer Kreislinie den Metallzylinder, der in Bild 1 gezeichneten Elektrodenhalterung berührt. Der Ring liegt mit den beiden Stirnflächen zwischen den

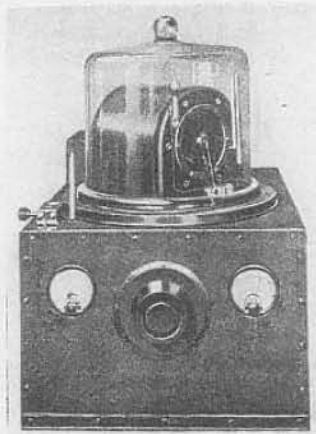


Bild 2. Quarzuhr nach Marrison.

beiden, durch einen Pyrexglasring in ihrem Abstand bestimmten Anregungselektroden. Der Steuerquarz befindet sich in einem ziemlich einfach aufgebauten Thermostaten, Bild 2 oben, der seinerseits wieder unter einer evakuierten Glasglocke untergebracht ist. In dem Kasten unterhalb des Thermostaten, Bild 2, ist der Steuersender in Pierce-Schaltung (Bild 2, ATM-Blatt J 153-1) untergebracht.

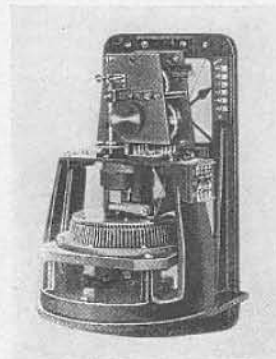


Bild 3. Synchronmotor nach Marrison.

Die Frequenz des Steuerquarzes beträgt 100000 Hz, sie wird nach Vorverstärkung auf 10000 und 1000 Hz geteilt. Die letzte Teilerstufe treibt den in Bild 3 gezeigten 1000 Hz-Synchronmotor, der mit einem Uhrwerk zur Zeitangabe gekoppelt ist. Die Messung der momentanen Gangdifferenzen wird über die 10000-Hz-Stufen vollautomatisch durchgeführt.

Die Aufhängung des Ringes auf einem Metallzylinder als Dorn ist erschütterungsempfindlich; ebenso ist der Thermostat bei dem nicht vernachlässigbaren Temperaturkoeffizienten zu inkonstant. Mc Illwraith vom Bureau of Standards versuchte diesen Übelständen durch starke Abfederung der Quarzhalterung, durch Zusatz eines äußeren Thermostaten und durch Unterbringung der gesamten Uhr in einem temperaturgeregelten Raum abzuwehren.

Die Quarzuhrn der PTR von Scheibe und Adelsberger. Giebe und Scheibe zeigten an Leuchtresonatoren die vorzügliche Frequenzkonstanz von Quarzstäben, die in einer von ihnen angegebenen Weise an den elastischen Schwingungsknoten gehalten werden. Sie fanden außerdem, daß Quarzstäbe dann einen Temperaturkoeffizienten der Frequenz gleich 0 besitzen, wenn die Stabachse mit der elektrischen Achse des Kristalles zusammenfällt, wenn der Querschnitt quadratisch ist und wenn das Verhältnis der Länge einer elastischen Halbwellenlänge des Stabes zu einer Querschnittsseite 4 beträgt. Von diesen Grundlagen ausgehend entwickelten Scheibe und Adelsberger den Steuerquarz der Quarzuhrn

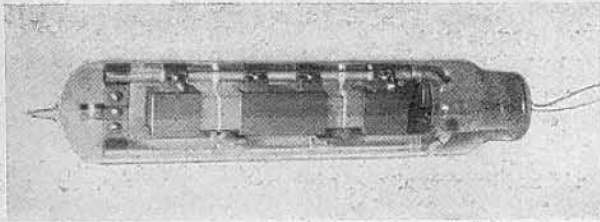


Bild 4. Steuerquarz nach Scheibe und Adelsberger.

der PTR: Länge $L = 91$ mm, Seitenlänge des Querschnittes = 11,4 mm, Frequenz = 60000 Hz, Temperaturkoeffizient = 0 bei ungefähr 36° C. Der Quarzstab schwingt in der 2. Eigenschwingung, er besitzt zwei Schwingungsknoten in je $L/4$ Länge von den Stirnflächen des Stabes entfernt; an diesen Knoten wird der Stab mittels Zwirnsfadens gehalten. Halterung und Elektrodenform nebst den in einem evakuierten Glasgefäß untergebrachten Quarzstab zeigt Bild 4. Die Schaltung der drei Anregungselektroden zeigt Bild 1, den Frequenzgang des Steuerquarzes mit der Temperatur zeigt Bild 3 im ATM-Blatt J 153—1.

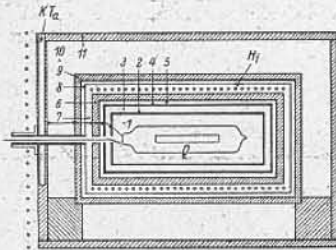


Bild 5. Innerer Thermostat.

Wichtig für die Konstanz der täglichen Gänge ist die Unabhängigkeit der Frequenz des Steuerquarzes von Temperaturschwankungen bei einer Temperatur von 36° C. Zu diesem Zweck ist der Steuerquarz in einem sehr sorgfältig aufgebauten Thermostaten untergebracht, der die Temperatur des Quarzes auf etwa $0,001^{\circ}$ C bei 36° C konstant zu halten vermag. Der Thermostat ist als Doppelthermostat mit einem Niveau bei 36° und bei 30° C ausgebildet. Bild 5 zeigt den aus einer Reihe von wärmeleitenden und wärmeisolierenden Schichten aufgebauten inneren Thermostaten, dessen Aluminiumhülle 11 die Heizwicklung für den als Holzkasten ausgeführten äußeren Thermostaten trägt. Der äußere Thermostat ist der rechte Kasten des Bildes 8, in diesem ist innen rechts der innere Thermostat zu sehen. Der innere Thermostat wird durch die Heizwicklung H_i (s. Bild 5) beheizt. Die Heizströme werden durch sehr empfindliche Kontaktthermometer über Röhrenrelais und magnetische Relais gesteuert. Kontrollvorrichtungen zeigen das regelmäßige Arbeiten der Thermometer an.

Der Steuerquarz bildet mit dem Steuersender und den Verstärkerstufen eine Einheit, die insgesamt in dem äußeren Thermostaten untergebracht ist; s. rechten Teil von Bild 8. Bild 6 zeigt die Schaltung dieser Einheit. Die Energiezuführung geschieht vom Licht-Wechselstromnetz über Gleichrichter und Pufferbatterien B . Diese haben die Energielieferung zu übernehmen, falls das Netz ausfällt. Verdrosselung und Kapazitäten 1...6 sorgen für Glättung des Gleichrichterstromes und für Fernhaltung von Störfrequenzen. Über die Ankoppel-

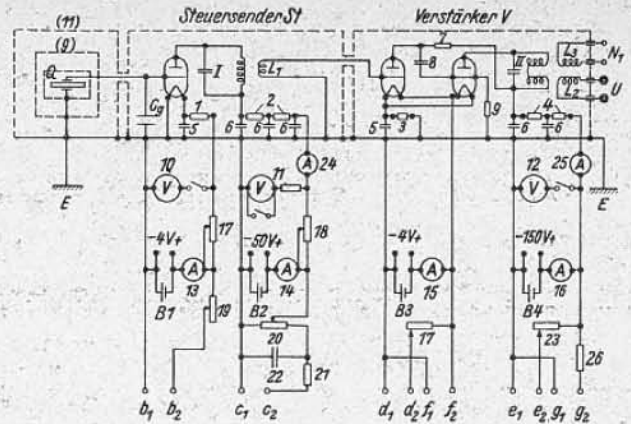


Bild 6. Steuerquarz, Steuersender und Verstärker.

spule L_3 kann eine Normalfrequenz N_1 von 60000 Hz entnommen werden, über die Spule L_2 erfolgt die Ankopplung der ersten Frequenzteilerstufe U (Bild 7) für 10000 Hz an den Verstärker V .

Drei Frequenzteilerstufen für die Teilung bis auf 250 Hz sind in ihrem Schaltplan in Bild 7 gezeichnet. Die abgestimmten Anoden-Schwingungskreise sind III, IV und V. Die Koppelung der Stufen untereinander erfolgt über die Spulen L_5 und L_7 , die Abnahme von Normalfrequenzen über $N_2...4$, die Ankopplung des Synchronmotors S_y über L_9 . Die Anodenkreise III...V können sich infolge Röhrenabnutzung, Spannungsschwankungen usw. um $\pm 2,5\%$ der Frequenz verstimmen, ehe ein Außertrittfallen der Stufen und damit ein für den täglichen Gang bzw. für die Normalfrequenzen völlig belangloses Stehenbleiben der Quarzuhr eintritt. Die dritte Frequenzteilerstufe kann selbstverständlich jederzeit wegfallen, falls man direkt von der 1000-Hz-Stufe aus einen Synchronmotor zu betreiben beabsichtigt. Die Frequenzteiler sind in dem linken Kasten des Bildes 8 untergebracht, das eine geöffnete Quarzuhr älteren Typs zeigt.

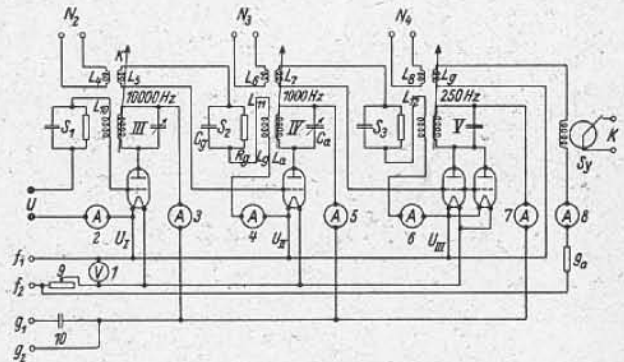


Bild 7. Frequenzteilerstufen.

Die Ansicht eines Synchronmotors für 250 Hz bringt das Bild 9. Man erkennt den Stator und den Rotor, das Untersetzungsgetriebe für die 1-Sekundenachse, die oben einen Arm trägt, der kurzzeitig den vorn rechts befindlichen Sekundenkontakt schließt. Ein weiterer Hilfskontakt sorgt für die Aussparung der 60. Sekunde (vorn links).

Die Quarzuhr ist sehr sorgfältig, ohne Rücksicht auf Raumbedarf und technisches Aussehen aufgebaut, da von vornherein alles ausgeschaltet werden sollte, was zu Einflüssen auf den täglichen Gang Anlaß geben könnte. Der Thermostat insbesondere war für einen

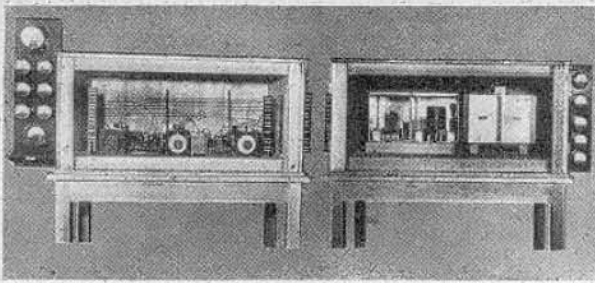


Bild 8. Quarzuhr nach Scheibe und Adelsberger.

Steuerquarz mit einem großen Temperaturkoeffizienten vorgesehen.

Wenn von der Bestimmung des täglichen Ganges abgesehen wird, so ist die Wartung der Quarzuhr denkbar einfach und von einer Hilfskraft ausführbar.

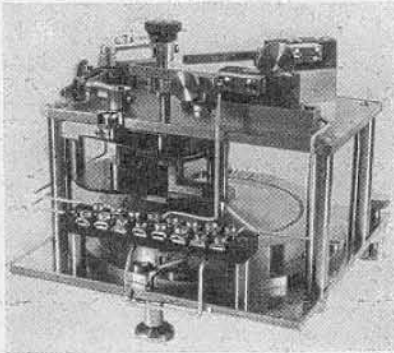


Bild 9. Synchronmotor nach Scheibe und Adelsberger.

Das „Time-Standard“ von Essen und Dye. Diese englische Konstruktion einer Quarzuhr verwendet als Steuerquarz ebenfalls einen Quarzring, der jedoch im Gegensatz zu der Marrisonschen Form so aus dem Kristall herausgeschnitten ist, daß die optische Achse senkrecht auf den beiden Stirnflächen des Ringes steht. Über die verschiedenen Möglichkeiten, derartige Ringe zu Dehnungsschwingungen anzuregen, ist ausführlich von Giebe und Scheibe berichtet worden. Der Ring wird im vorliegenden Fall in der Longitudinalschwingung nullter Ordnung ($k = 0$) angeregt, um von vornherein zu einer niedrigen Frequenz zu kommen; diese ist bei den gewählten Dimensionen — innerer Ringdurchmesser 75,28 mm, äußerer 98,60 mm und Dicke des Ringes von 16,28 mm — 20000 Hz.

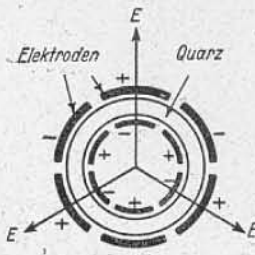


Bild 10. Ring nebst Elektroden nach Dye.

Bei der Ordnungszahl $k = 0$ werden zur Anregung des Ringes 12 Elektroden benötigt, die in der nach Bild 10 gezeichneten Weise zu den parallel den Ringflächen verlaufenden elektrischen Achsen E orientiert und gepolt sein müssen. Besondere Schwierigkeiten bereitet auch hier die unverrückbare Halterung des Quarzringes zwischen den Anregungselektroden. Die Aufgabe ist von

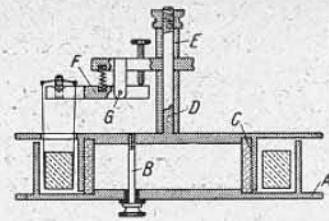


Bild 11. Ringhalterung.

Dye und Essen in der Weise — Bild 11 — gelöst worden, daß der Ring in drei um 120° versetzten Drahtschlingen gefaßt wurde, die ihrerseits wieder von je einem Halter F schwebend gehalten werden. Die Halter F sind an einer gemeinsamen Säule DE befestigt. Die Fassung des Ringes muß mit größter Sorgfalt erfolgen, da der Ring keine Schwingungsknoten besitzt, sondern mit seinem gesamten Umfang gleichmäßig in radialer Richtung pulsiert. Der Steuerquarz besitzt mit $2,5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ einen verhältnismäßig großen Temperaturkoeffizienten der Frequenz.

Die Halterung befindet sich in einem als Thermostat ausgebildeten evakuierten Glasgefäß, das auf einer Temperatur von 36°C gehalten wird. Der Thermostat steht zum Schutz gegen Erschütterungen in einem Gewölbe, dessen natürliche Temperaturschwankung 1°C nicht übersteigt.

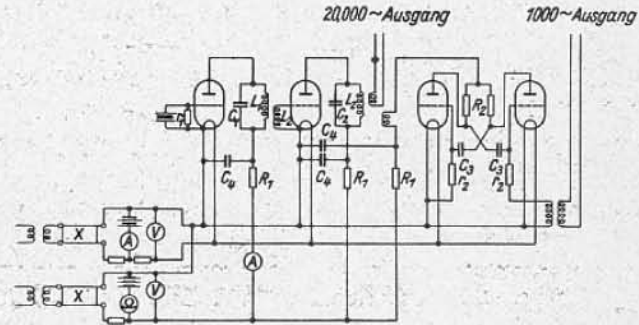


Bild 12. Schaltschema der Quarzuhr nach Dye] und Essen.

Die Anregung des Steuerquarzes erfolgt in der Pierce-Schaltung, s. Bild 12. Die schwachen Schwingungen werden in einem nachgeschalteten Verstärker auf Arbeitsamplitude gebracht. Die Teilung der Frequenz auf 1000 Hz geschieht über eine Multivibratorstufe, die Kippschwingungen der Frequenz 1000 Hz ausführt. Die Multivibratorfrequenz wird durch die Kapazitäten C_3 und durch die Widerstände R_2 bestimmt; die Kippschwingungen lassen sich leicht synchronisieren.

Die Nachteile der Ringaufhängung und der große Temperaturkoeffizient veranlaßten Essen, eine andere Form der Ringhalterung zu wählen. Nach Giebe und Scheibe war bekannt, daß die Anregung eines Quarzringes zu Dehnungsschwingungen der Ordnungszahl $k = 3$ besonders einfache Elektrodenanordnungen erforderte. Essen wählte daher die Eigenschwingung des Ringes mit der Ordnungszahl $k = 3$. Längs des Umfanges des Ringes bilden sich unter diesen Umständen 3 elastische Longitudinalwellen, mit 6 Schwingungsknoten aus. Zur Anregung sind dann bei einem dem Bilde 10 entsprechenden Kristallschnitt nur je eine äußere und eine innere Zylinderelektrode nötig (also keine Aufteilung in je 6 Zylindersegmente wie bei Bild 10).

Die Aufhängung des Ringes wird durch eine Lagerung des Ringes auf drei Stützschrauben ersetzt, die den Ring von unten in drei um 120° versetzten Schwingungsknoten unterstützen. Die Stützschrauben enden zu diesem Zwecke in 0,25 mm dicken, gerundeten und polierten Spitzen. An den Auflagestellen ist der Ring mit je einer v-förmigen radialen Rille von 0,25 mm Tiefe auf seiner unteren Stirnfläche versehen, in die die Spitzen der Stützschrauben hineinragen. Die Rillen müssen genau mit den radialen Knotenlinien der Schwingung zusammenfallen. Durch diese Lagerung ist eine radiale oder tangentielle Verschiebung des Ringes unmöglich gemacht. Das Herausspringen des Ringes nach oben wird durch drei Gegenschrauben verhindert, die sich bis auf 0,01 mm Distanz der oberen Stirnfläche des Ringes nähern.

Der Steuerquarz besitzt einen äußeren Durchmesser von 61,44 mm, einen inneren von 45,22 mm und eine Dicke von 11,05 mm. Der Temperaturkoeffizient ist 0 bei etwa 25°C . Der Steuerquarz ist in einem Thermostaten, der die Temperatur auf $0,01^\circ\text{C}$ konstant hält untergebracht. Die Frequenz beträgt 100000 Hz.

Die Frequenzteilung geschieht über zwei Multivibratoren auf 10000 Hz und 1000 Hz.

Die Quarzuhr von Rohde und Leonhardt. Die Konstrukteure verwenden als Steuerquarz einen Quarzstab, der in der 2. longitudinalen Eigenschwingung angeregt wird. Die Stabachse verläuft parallel der elektrischen Achse des Quarzkristalles. Die Stablänge beträgt 54 mm. Um einen Temperaturkoeffizienten 0 bei der gewählten Arbeitstemperatur zu erzielen, wurde das Verhältnis der quadratischen Querschnittsseite zur elastischen Halbwellenlänge wie 1 : 4 gewählt (also entsprechend den Angaben von Giebe und Scheibe). Die Seitenlänge ist daher gleich 6,8 mm. Nähere Angaben über die Halterung fehlen, doch handelt es sich unzweifelhaft um die in Bild 4 gezeigte Konstruktion von Scheibe und Adelsberger, wenn auch die Frequenz 100000 Hz beträgt.

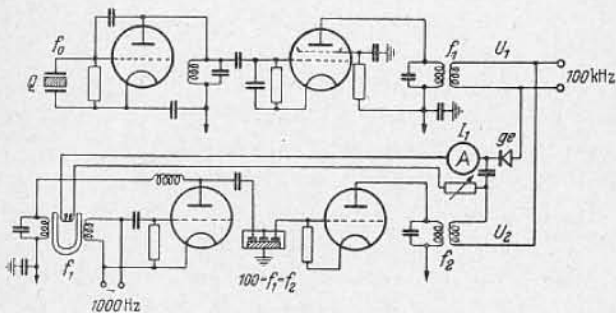


Bild 13. Schaltschema der Quarzuhr nach Rohde und Leonhardt.

Die Quarztemperatur von 39°C wird mittels Doppelthermostaten auf etwa $0,001^\circ\text{C}$ konstant gehalten. Die Regulierung erfolgt über Quecksilberkontaktthermometer mit magnetischem bzw. Röhrenrelais.

Die Frequenzteilung geschieht (anders als bei den bisher beschriebenen Uhren) in einer einzigen Stufe auf 1000 Hz herab. Bild 13 zeigt Schaltschema und Prinzip der Frequenzteilung. Der Steuerquarz arbeitet in Verbindung mit der ersten Röhre in der Pierce-Schaltung. In einer nachfolgenden Stufe wird die Schwingung der 100000-Hz-Frequenz auf die Spannung U_2 verstärkt. In einem Stimmgabelgenerator wird ferner mittels einer Stimmgabel eine Frequenz von 1000 Hz erzeugt, der Wechselstrom dieses Generators ist durch Verzerrungsmaßnahmen mit Harmonischen bis zur 100. Oberschwingung angereichert. Über einen Filterquarz für 100000 Hz wird diese Oberschwingung ausgesiebt, verstärkt und mit ihrer Spannung U_1 der Spannung U_2 der Quarzfrequenz zugesetzt. In einem Gleichrichter *ge* erfolgt die Gleichrichtung beider Spannungen. Der sich hieraus ergebende Gleichstrom I_1 , der je nach der Phasenlage beider Schwingungen in seiner Stärke schwankt, beeinflusst über eine zwischen den Stimmgabelzinken angeordnete Steuerspule die Frequenz der Stimmgabelschwingungen so, daß der Synchronismus zwischen Quarzfrequenz und Stimmgabelfrequenz auch bei größeren Schwankungen des Stimmgabelgenerators erhalten bleibt.

Der Wechselstrom der Frequenz 1000 Hz des Stimmgabelgenerators treibt eine Synchronuhr mit einem 24-Stundenwerk (Bild 14 rechts), einen Impulskontakt, dessen Phase gegen einen festen 1 s-Kontakt an einem Zifferblatt (Bild 14 rechts außen) abgelesen werden kann, einen festen 1 s-Kontakt und einen kleinen 50-Hz-Generator. Das Bild 14 zeigt die gesamte, auf kleinem Raum untergebrachte und mit gutem technischen Äußeren aufgebaute Quarzuhr selbst.

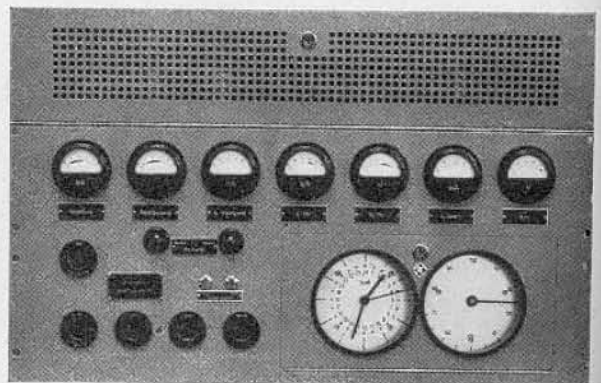


Bild 14. Ansicht der Quarzuhr nach Rohde und Leonhardt.

Schrifttum.

Scheibe, Piezoelektrizität des Quarzes, Dresden: Th. Steinkopff 1938. — Scheibe und Adelsberger, Die technischen Einrichtungen der Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Z. Hochfrequenztechn. 43 (1934), S. 37...47. — Rohde und Leonhardt, Quarzuhr und Normalfrequenz-Generator, Elektr. Nachr. Techn. 17 (1940), S. 117...124. — Essen, The Dye Quartz Ring Oscillator as a Standard of Frequency and Time, Proc. roy. Soc. Lond. (A) 155 (1936) S. 498...519. — Essen, A New Form of Frequency and Time Standard, Proc. phys. Soc. 50 (1938) S. 413...423. — Marrison, A High Precision Standard of Frequency, Proc. Inst. Rad. Engrs. 17 (1929), S. 1103...1122. — McIlwraith, The Accuracy of the Primary Frequency-Standard of the Bureau of Standards, Nat. Res. Council. (1931), S. 29...32. — Giebe und Scheibe, Über Leuchtresonatoren als Hochfrequenznormale, Z. Hochfrequenztechn. 41 (1933), S. 83...96. — Giebe und Scheibe, Elektr. Nachr. Techn. 5 (1928), S. 65...82.

Quarzuhren

IV. Gangergebnisse

J
153-4

Verfasser: Dr. A. Scheibe, Berlin

DK 531.764.5

Sehr ausführliche Veröffentlichungen liegen über die Gänge der Quarzuhren nach Scheibe und Adelsberger vor; die beiden Verfasser untersuchten eingehend die Eignung der Quarzuhren als Zeitnormale und zeigten, daß diese Uhren den astronomischen Pendeluhrn kurzzeitig und langfristig überlegen sind. Quarzuhren gleichen Modells befinden sich noch im Geodätischen Institut Potsdam und in der Deutschen Seewarte Hamburg. Auch in diesen Instituten wurde die Überlegenheit der Quarzuhren gegenüber den astronomischen Pendeluhrn festgestellt. Im Gegensatz zu diesen Quarzuhren fehlen über die weiteren in den ATM-Blättern J 153-1 bis -3 genannten Uhrenkonstruktionen ausführliche und langjährige Meßreihen. Es sollen daher im folgenden im wesentlichen die Gangleistungen der erstgenannten Quarzuhren besprochen und im Vergleich dazu diejenigen der anderen behandelt werden.

Man studiert das Einlaufen zweckmäßig durch Messung der „momentanen“ Gangdifferenz γ (s. ATM J 153-1) gegen eine im Gang schon eingelaufene oder sehr gangkonstante Quarzuhr; in dieser Weise wurde z. B. die Kurve von Bild 1 ermittelt. Aus der Kurve läßt sich dann sehr genau der Zeitpunkt ermitteln, wann etwa die Quarzuhr als im „Alterungszustand“ befindlich betrachtet werden kann; ist dieser Zustand eingetreten, so kann man sich darüber schlüssig entscheiden, ob die Quarzuhr mit dem betreffenden Steuerquarz für Zeitmessungen brauchbar ist oder nicht.

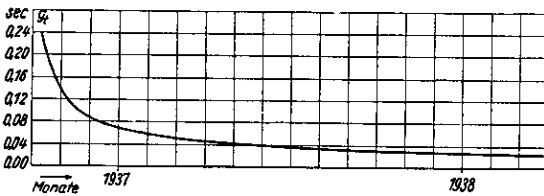


Bild 1. Einlauf- u. Alterungskurve einer Quarzuhr.

Einlauferscheinungen. Die Inbetriebsetzung neuer Quarzuhren gibt nicht sofort einen unveränderlichen Gangwert, sondern es zeigte sich, daß dieser mit der Zeit anfänglich sehr stark und dann allmählich schwächer werdend anscheinend einem Endwert zustrebt. Bild 1 gibt das Verhalten des Ganges der Quarzuhr V der PTR als Beispiel gut wieder. Man sieht, daß nach etwa 1...2 Monaten „Einlaufzeit“ die Kurve ziemlich plötzlich nach kleineren Gangänderungsbeträgen zu umbiegt. Der Teil der Kurve bis kurz nach Vollendung des Umbiegens soll als „Einlaufkurve“, der andere Teil als „Alterungskurve“ bezeichnet werden. Es ist mit Sicherheit anzunehmen, daß an dem „Einlaufen“ sowohl der Steuerquarz als auch die Röhre und Schaltung des Steuersenders ursächlich beteiligt sind. Die Frage des Anteiles der einzelnen Komponenten von Quarz und Schaltung an Verlauf und Betrag des Einlaufens sind noch ungeklärt. Fest steht, daß das Einlaufen bei den einzelnen Quarzuhren völlig verschieden stark erfolgen kann. Bild 2 zeigt nach Rohde und Leonhardt das Einlaufen von 4 gleichen Steuerquarzen. Das Einlaufen ist hier nach etwa 4...5 Wochen beendet; die Verfasser finden bei 40 untersuchten Steuerquarzen das gleiche Verhalten. Sie bestätigen die Erfahrungen, daß der Gang in der Einlaufzeit durchweg kleiner wird.

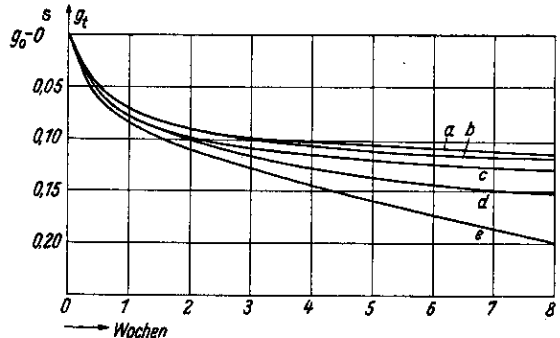


Bild 2. Einlaufkurven verschiedener Quarzstäbe.

Alterungserscheinungen. Die Auftrennung der Kurve von Bild 1 in zwei Teile ist natürlich etwas willkürlich. Werden hohe Ansprüche an die Gangleistung gestellt, so wird der Zeitpunkt des Beginns der „Alterung“ natürlich später als bei weniger hohen Ansprüchen angesetzt werden. Unter dem Begriff „Alterung“ soll auch nur die Tatsache verstanden werden, daß das Einlaufen jetzt so schwach und die Konstanz, mit der das Einlaufen abnimmt, so groß geworden sind, daß für diese Quarzuhr eine lineare Gangformel gemäß (14) ATM, J 153-1 (eventuell unter Hinzunahme noch eines quadratischen Gliedes), in Hinblick auf die geforderte Gangleistung abgeleitet werden kann.

Die Gangformel für den mittleren täglichen Gang über ein längeres Meßintervall lautet

$$\bar{G}_{n,t} = \bar{G}_{n,o} + \Delta G \cdot t \pm \delta G.$$

Die „Alterung“ der Quarzuhr wird wertmäßig mit dem Betrag der mittleren täglichen Gangänderung ΔG identifiziert. Über die Ursache der „Alterung“ wird damit nichts gesagt; sie wird im wesentlichen irgendwie auf die gleichen Ursachen wie das „Einlaufen“ zurückgeführt werden können.

Bei den Steuerquarzen des Bildes 2 beträgt ΔG nach 8 Wochen noch etwa 0,002, 0,001, 0,0004, 0,0003 bzw. 0,0002 s/d²; Rohde und Leonhardt nennen nur die beiden Steuerquarze b und a mit 0,0003 bzw. 0,0002 s/d² als für Quarzuhren brauchbar.

Die „momentanen“ täglichen Gangdifferenzen γ . Das tägliche Verhalten einer Quarzuhr kann nur durch Messung der Gangdifferenzen γ überwacht werden (ATM J 153—3). Es genügt im allgemeinen, den Meßfehler $\delta\gamma$ bei der Bestimmung von γ in der Größenordnung von etwa 0,0002 s/d zu halten, da dies für die meisten praktischen Zwecke vollauf genügt. Bild 3 zeigt den Verlauf der Gangdifferenz γ der beiden Quarzuhren III und VIII der PTR in den ersten acht Monaten 1938. Der Gang beider Uhren ist danach relativ zueinander innerhalb $\pm 0,001$ s/d unveränderlich geblieben. Es bestätigt sich hier das bereits früher von Scheibe und Adelsberger mitgeteilte Ergebnis, daß die mittlere zufällige Gangschwankung oder Gangänderung $\Delta\gamma$ den Wert von 0,0003 s/d nicht übersteigt.

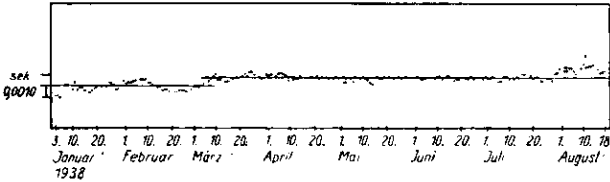


Bild 3. Verlauf der »momentanen« Gangdifferenz zweier Quarzuhren.

Das Bild 3 ist geradezu ein Beispiel für die Brauchbarkeit des Begriffes „momentane“ Gangdifferenz γ bei der Quarzuhren-Überwachung. Man erkennt z. B. an dem Bilde deutlich eine Sprungstelle im Gangverlauf zwischen 1. und 10. März, ohne daß man von vornherein sagen könnte, welcher Quarzuhr der Gangsprung zuzuordnen wäre; beide Quarzuhren müssen ja bei einem so gleichmäßigen Verlauf, wie ihn Bild 3 zeigt, a priori als gleichwertig angesehen werden. Das Vorhandensein weiterer Quarzuhren und ihre Überwachung gibt nun die Möglichkeit, die Sprungstelle in der Gangdifferenz näher zu analysieren. Bild 4 zeigt den Verlauf der Gangdifferenzen γ bei weiteren Uhren, woraus eindeutig Quarzuhr III als diejenige Uhr abzuleiten ist, die den Gangsprung erlitten hat. Die nach dem Bilde mögliche Abgrenzung des Sprungverlaufes nach Zeit und Betrag gestattet bei Zeitmessungen mit der Quarzuhr III den Einfluß der Gangänderung rechnerisch anzubringen.

Bild 3 zeigt aber auch weiterhin, daß die Gangdifferenz beider Uhren in der Zeit April bis Juli 1938

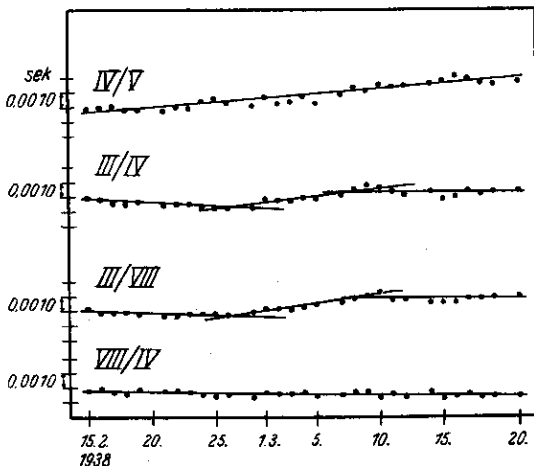


Bild 4. Bestimmung der Gangänderung einer Quarzuhr mittels »momentaner« Gangdifferenzen.

ganz besonders konstant geblieben ist. Bild 5, als vergrößerte Wiedergabe des Gangverlaufes in diesem Zeitabschnitt, beweist, daß die Schwankung $\Delta\gamma$ der Gangdifferenz γ mit einigen wenigen Ausnahmen während

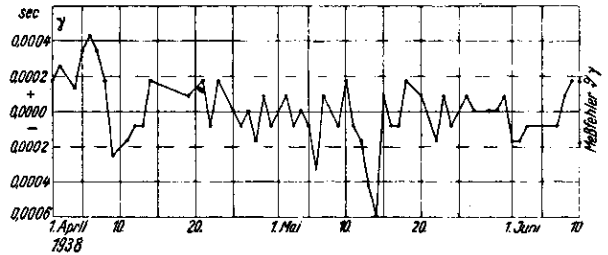


Bild 5. Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 3.

der Beobachtungsdauer von 70 Tagen nur innerhalb eines Betrages von $\pm 0,0002$ s/d lag. Da nun bei diesen Messungen mit einer Meßgenauigkeit $\delta\gamma$ von $\pm 0,0002$ s/d gearbeitet wurde, so bedeutet dies, daß die Kurve in dieser Zeit im wesentlichen nur den Meßfehler wiedergibt und die Gangdifferenz noch konstanter verlief, als dem oben angegebenen mittleren Werte von $\Delta\gamma = 0,0003$ s/d entspricht. Daß die Quarzuhren tatsächlich weit geringere Gangschwankungen haben können — zum mindesten während kürzerer Beobachtungsintervalle —, konnte darum auch durch Anwendung eines geringeren Meßfehlers $\delta\gamma$ bewiesen werden. Bild 6 zeigt dies an der momentanen Gangdifferenz γ zwischen der Quarzuhr I (nicht IV) und III der PTR. Das Beobachtungsintervall umfaßte 12 Stunden; der Meßfehler $\delta\gamma$ betrug nur 0,00001 s/d. Die gesamte Schwankung $\Delta\gamma$ liegt innerhalb von nur 0,0001 s/d, während die stündliche Schwankung der Differenz im allgemeinen wiederum der Meßgenauigkeit 0,00001 s/d gleicht. Die zufällige Schwankung der täglichen Gänge (in ihrer Differenz) ist also außerordentlich klein.

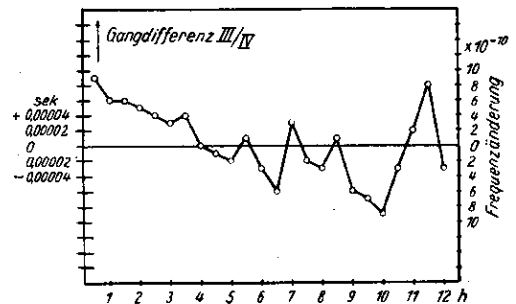


Bild 6. Verlauf der »momentanen« Gangdifferenz bei hoher Meßgenauigkeit.

Im Bild 6 ist auf der rechten Seite die der Gangschwankung entsprechende Frequenzschwankung in Zehntelmilliardsteln angeschrieben.

Auch bei den Quarzuhren des Geodätischen Institutes erreichen die Schwankungen von γ selten Werte, die 0,0002 s/d übersteigen. Bei zwei Uhren wurde während mehrerer Monate dieser Betrag ebenfalls nicht erreicht (Pavel); UHink bestimmt in Übereinstimmung mit den obigen Angaben die mittlere zufällige Gangschwankung $\Delta\gamma$ bei den Differenzmessungen zu 0,0002 s/d.

Für kurze Zeitdauern, etwa Stunden und Tage, kommt die Konstanz von γ der Uhren von Rohde und Leonhardt bzw. Essen derjenigen der Uhren nach

Modellen der PTR etwa gleich. Meßreihen, die jedoch Schlüsse über größere Zeitintervalle — und das ist für Zeitbestimmungen sehr wichtig — gestatten, sind von den genannten Verfassern noch nicht veröffentlicht. Marrison gibt für die Crystal-clock Schwankungen von γ über Stunden in der Größe von 0,001...0,002 s/d an; McIlwraith findet nur etwa 0,003 s/d. Diese Uhr liegt also eine Größenordnung unter der Quarzuhr der PTR.

Die absoluten Gänge G_t und $\bar{G}_{n,t}$ der Quarzuhren. Für die Zeitbestimmung über größere Zeiträume hinweg ist das Verhalten des mittleren täglichen Ganges $\bar{G}_{n,t}$ von besonderer Wichtigkeit; eine Extrapolation des Uhrstandes wird sich besonders auf diesen Wert stützen. Für die täglichen Zeitangaben spielt dagegen der tägliche Gang G_t bzw. die zufällige tägliche Gangschwankung δg eine besondere Rolle. Wie bereits in ATM, J 153-1 und -2 näher ausgeführt wurde, ergibt nur die Bestimmung von $\bar{G}_{n,t}$ ein zuverlässiges Werturteil über das Verhalten der Quarzuhr und ihre Güte. Scheibe und Adelsberger verfahren daher so, daß sie zur sicheren Verminderung des Meßfehlers die Beobachtungszeit auf $n = 30$ Tage ausdehnen und zur Erhöhung der Anzahl von $\bar{G}_{n,t}$ -Werten je vom 1. zum 1., 10. zum 10. und 20. zum 20. der Monate messen. Man erhält dann zwar einen schon ziemlich ausgeglichenen Gangverlauf, ist aber auch sicher, das wirkliche Verhalten der Uhr vor sich zu sehen.

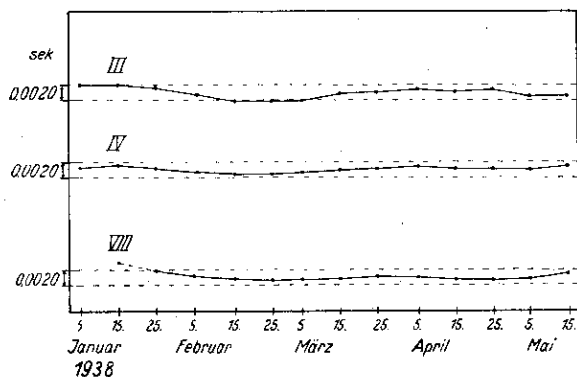


Bild 7. Absolute Gänge dreier Quarzuhren während eines kürzeren Beobachtungsintervalls.

Bild 7 zeigt für drei Quarzuhren der PTR das Gangverhalten $\bar{G}_{30,t}$ in einem Zeitintervall von 4 Monaten. Man sieht, daß die maximale Änderung der Gänge $\bar{G}_{30,t}$ innerhalb von $\pm 0,001$ s/d bei sämtlichen 3 Uhren liegt. Eine geringe Schwankung im Verlauf der Gänge, die bei den drei Uhren fast genau gleich verläuft, ist jedoch unverkennbar.

Bild 8 stellt den Gangverlauf $\bar{G}_{30,t}$ der Quarzuhr III über 3 Jahre und 4 Monate, den der Quarzuhr IV über 1 Jahr und 7 Monate dar. Bei der Quarzuhr III erkennt man deutlich eine „Alterung“ im Sinne eines langsam kleiner werdenden Ganges, bei Quarzuhr IV macht sich in der gezeigten Periode ebenfalls eine, wenn auch sehr schwache Gangverringernng bemerkbar. Auffällig sind weiterhin die beiden starken Zacken im Verlauf des Ganges der III und die Übereinstimmung des Verlaufes beider Uhren. Scheibe und Adelsberger analysierten den Verlauf der III in dem Zeitraum 1934 und 1935 näher und zeigten für diese und andere Quarzuhren, daß die

gemessenen Gangwerte über lange Zeitspannen durch die obige Gangformel dargestellt werden können.

Der bei diesen Berechnungen gefundene Wert für den Anfangsgang $\bar{G}_{30,0}$ ist für die Beurteilung der Güte der Uhr unwesentlich; von größerer Wichtigkeit ist die

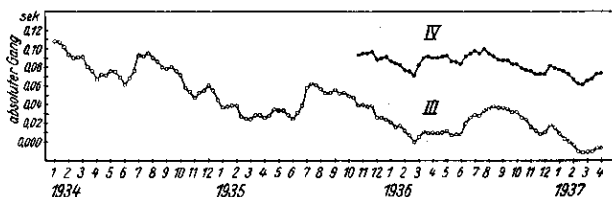


Bild 8. Absolute Gänge zweier Quarzuhren über ein mehrjähriges Beobachtungsintervall.

Gangänderung ΔG (Alterung?). Aus Bild 8 läßt sich für Uhr III über den ganzen Zeitraum ein mittlerer Betrag $\Delta G = -0,000017$ s/d² ableiten. Eine Aufteilung in Jahresintervalle zeigt jedoch eine allmähliche Abnahme von $\bar{\Delta G}$; es wurden folgende Werte gefunden: 1933: $\Delta G = -0,00009$ s/d²; 1934 und 1935: $\bar{\Delta G} = -0,000019$ s/d²; 1936: $\bar{\Delta G} = -0,000003$ s/d². In ähnlichen Größenordnungen liegen die Gangänderungen der anderen Quarzuhren der PTR; so wird für die zum Bilde 1 herangezogene Quarzuhr V für 1938 ein Betrag von $-0,00003$ s/d² genannt. Einen ganz besonders geringen mittleren $\bar{\Delta G}$ -Betrag hat die Quarzuhr IV mit $-0,000001$ s/d² von 1936...1938. Diese Uhr hat also praktisch bei der Mittelung über Jahreslängen keine Gangänderung.

Für die ΔG -Beträge der Quarzuhren des Geodätischen Institutes werden von Uhink folgende, teilweise mit oben vergleichbaren Zahlen genannt: Uhr Q 1 $+0,000005$; Q 2 $-0,000279$; Q 3 $-0,000004$ und Q 4 $-0,000448$ s/d².

Rohde und Leonhardt geben als Gangänderungsbeträge folgende Werte an: Quarzuhr A 1 0,00013; A 2 0,0004 und A 0,0003 s/d².

Essen spricht nur von einem kleinen und gleichförmigen negativen täglichen Gangänderungsbetrag ohne Zahlenangabe.

Die Gangänderungsbeträge der Quarzuhren der PTR sind so klein und in ihrer Gleichförmigkeit so konstant, daß bei Extrapolationen nur geringe Standfehler übrigbleiben. Würde man beispielsweise einen $\bar{\Delta G}$ -Wert von 0,00002 s/d² überhaupt nicht berücksichtigen, so wäre die dadurch verursachte Fehlangebe in der Zeit nach 90 Tagen nur 0,081 s; s. a. ATM, J 153-1.

Die Differenz zwischen gemessenem und nach der Gangformel mit $\bar{\Delta G}$ berechnetem Gangwert läßt die mittlere zufällige Gangschwankung δG , die ja ein Maß für die Quarzuhrengüte ist, übrig. Man verlangt, daß dieser Wert möglichst klein ist. Scheibe und Adelsberger finden, falls man sämtliche Schwankungen während der Beobachtungsperiode allein der Quarzuhr zuschiebt, für den Einzelwert des mittleren 30tägigen Ganges einen zufälligen Gangschwankungsbetrag von 0,0013 s/d. Die beiden Verfasser weisen aber auch nach, daß in diesem Betrag ein erheblicher Anteil seitens fehlerhafter astronomischer Zeitangaben liegt, so daß die wirkliche mittlere zufällige Gangschwankung der Quarzuhren nur einen Betrag von

0,00020 s/d

hat. Dieser Betrag ist etwa 4...5mal kleiner als der Wert der mittleren zufälligen Gangschwankung einer aus drei Zeitinstituten gebildeten mittleren astronomischen Uhr; im Vergleich zu einer einzigen astronomischen Pendeluhr würde das Ergebnis noch günstiger ausfallen.

Etwas schwieriger ist die Frage zu beantworten, wie groß die mittlere zufällige tägliche Gangschwankung δg ist? Es ergibt sich bei den Quarzuhren der PTR mit Sicherheit, daß sie kleiner als 0,001 s/d ist; wahrscheinlich liegt sie bei 0,00030 s/d. Uhink nennt sogar nur einen Betrag von 0,0002 s/d.

Die Konstanz der astronomischen Tageslänge. Bild 8 läßt bei III zwei starke Gangzacken erkennen. Eine kritische Besprechung der Ergebnisse mehrerer Quarzuhren für 1934 und 1935 lehrt nun, daß mit höchster Wahrscheinlichkeit die Gangverschiebungen von etwa 0,004s nicht den Quarzuhren, sondern dem astronomischen Zeitmaß, d. h. der astronomischen Tageslänge zukommt. Zu gleichen Folgerungen kommen durch Messungen an den beiden Quarzuhren des Geodätischen Institutes Pavel und Uhink. Im Jahre 1936 ist sowohl nach Quarzuhr III als auch nach IV der Ganganstieg weniger ausgeprägt. Nach Pavel und Uhink konnte die Schwankung des astronomischen Zeitmaßes in der Zeit von Ende 1936 ab bis Ende 1939 bei ihren Uhren nicht beobachtet werden; die ermittelten Änderungen des täglichen Ganges überschritten dort nur selten 0,001 s und erreichten niemals 0,002 s.

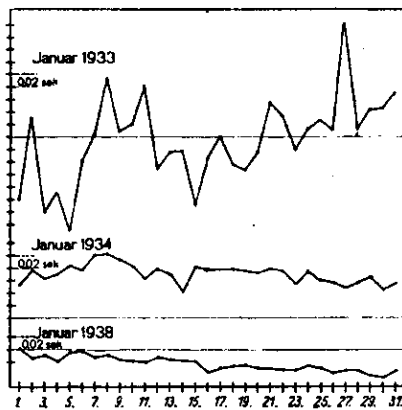


Bild 9. Verbesserungen der Deutschen Seewarte vor und nach Einsatz der Quarzuhren.

Erfolge im Zeitdienst. Der Einsatz der Quarzuhren im Zeitdienst der Deutschen Seewarte infolge Durch-

gabe der Zeitkontakte der Quarzuhren der PTR über Fernleitung bzw. durch eigene Quarzuhren und im Zeitdienst des Geodätischen Institutes trug sehr schnell zu einer Verringerung des Fehlers der Verbesserungen S_2 (s. ATM J 153—1) mit bei. Bild 9 gibt für den Monat Januar (im übrigen willkürlich gewählt) der Jahre 1933, 1934 und 1938 die von der Deutschen Seewarte mitgeteilten Verbesserungsbeträge wieder. Der Einsatz der Quarzuhren der PTR erfolgte im Oktober 1933; derjenige der Hamburger Quarzuhren im April 1936. Die Verringerung der Schwankung in den Verbesserungen und der Unsicherheit im absoluten Betrage ist auffällig. Bild 10 zeigt den Rückgang in der Unsicherheit in der Bewertung der Verbesserungen durch die beiden deutschen Zeitinstitute. Auch hier ist ein großer Fortschritt zu verzeichnen.

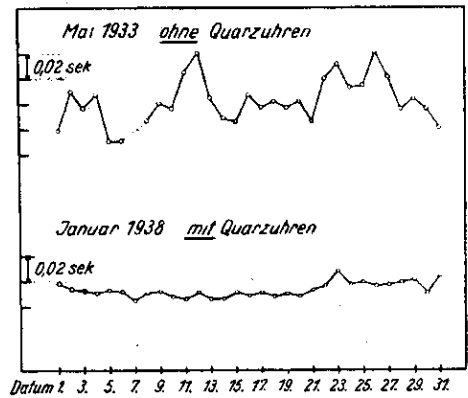


Bild 10. Einfluß der Quarzuhren auf die Differenzen der Verbesserungen Hamburg—Potsdam.

Der Einsatz der Quarzuhren hat wesentlich mit bewirkt, daß hinsichtlich der Genauigkeit der Zeitangaben im internationalen Zeitdienst die deutschen Institute mit an erster Stelle stehen (Repsold).

Im Zeitdienst der Zeitinstitute zeigte sich infolge der hohen Genauigkeit der Quarzuhren weiterhin bald, daß die Genauigkeit der astronomischen Zeitbestimmung, d. h. der Abnahme der Zeit von den Zeitsternen und ihre Übertragung auf eine Uhr, der Genauigkeit der Quarzuhren nicht mehr gewachsen ist (Lange). Es ist dadurch der Zustand eingetreten, daß über kürzere Beobachtungsintervalle hinweg die Quarzuhr die Genauigkeit der astronomischen Zeitbestimmung zu kontrollieren gestattet.

Schrifttum.

Scheibe und Adelsberger, Frequenz und Gang der Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Ann. Phys. 18 (1933), S. 1...25. — Scheibe und Adelsberger, Schwankungen der astronomischen Tageslänge und der astronomischen Tageslänge nach den Quarzuhren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Physik. Z. 37 (1936), S. 185...203. — Scheibe und Adelsberger, Nachweis von Schwankungen der astronomischen Tageslänge im Jahre 1935 mittels Quarzuhren. Physik. Z. 37 (1936), S. 415. — Pavel und Uhink, Die Quarzuhren des Geodätischen Institutes in Potsdam. Astr. Nachr. 257 (1935), S. 366...390. — Uhink, Quarzuhren, Z. Geophys. 12 (1936), S. 21...24. — Pavel, Jahresber. d. Geod. Inst. Potsdam (1940), S. 10...12. — Lange, Astronomische Zeitmessung. Schriftenreihe d. Ges. f. Zeitmeßkde. und Uhrentechn. 9 (1938), S. 45...60. — Repsold, Änderungen im Zeitdienst der Deutschen Seewarte. Astr. Nachr. 253 (1934), S. 157...164. — Repsold, Die Güte der deutschen Funkzeichen. Ann. d. Hydr. u. Mar.-Meteorologie (1937), S. 574...577. — Scheibe, Zeitmessung in der PTR mittels Quarzuhren. Ann. franc. de Chronom. 8 (1938), S. 53...69. — Scheibe und Adelsberger, Vortrag Ges. f. Zeitmeßkde. u. Uhrentechn., 1938.