

# Die Quarzuhr

Von Dr. K. Giebel (Glashütte i. Sa.)

Im Jahre 1929 beschrieb Marrison eine im Laboratorium der Bell Telephone Co. gebaute Zeitmeßvorrichtung, die einen durch Quarzoszillator gesteuerten Röhrensender enthält. Auch bei den neuzeitlichen Rundfunksendern wird Quarzsteuerung angewendet, um die Trägerwelle des Senders auf gleicher Frequenz zu erhalten. Seitdem stehen in Unterhaltungsblättern und Zeitschriften öfter Aufsätze, die von der unerhörten Genauigkeit dieser Einrichtungen sprechen. In der Tat ist die Genauigkeit der Quarzuhr vorzüglich, so daß die Uhr für wissenschaftliche Zeitmessung hervorragend geeignet erscheint. Deshalb müssen wir uns mit ihr vertraut machen und möchten

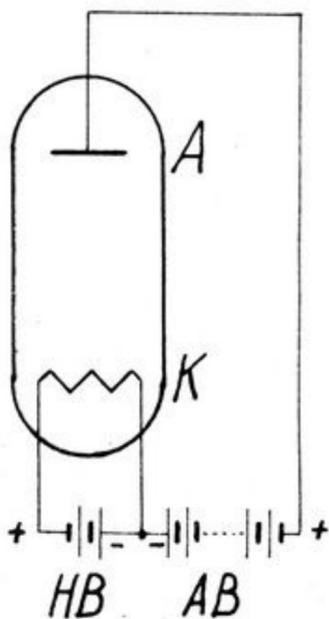


Abb. 1

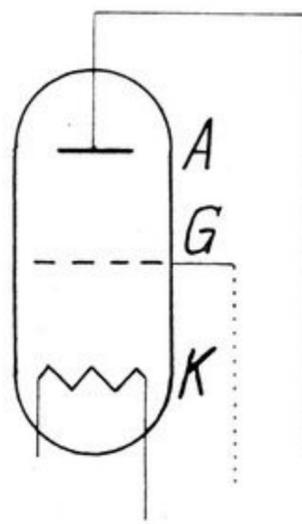


Abb. 2

mehr darüber wissen, als in Familienblättern darüber gesagt werden kann und aus Abbildungen zu ersehen ist, in denen auch der Kundige nur Röhren, Spulen, Kondensatoren und elektrische Meßinstrumente erkennen kann. Wir wollen im folgenden versuchen, das Wichtigste über den Aufbau der Quarzuhr in einfacher Form zu beschreiben.

Der Hauptteil der Uhr ist der Röhrensender, wie er auch in Sendestationen für Wellentelegraphie und -telephonie benutzt wird. Wenden wir uns zuerst der Röhre zu (Abb. 1). In dieser Röhre, die so gut wie luftleer ist, befindet sich unten ein Draht K (Kathode) und oben eine Platte A (Anode). An diese beiden Elektroden ist mittels einer Anodenbatterie (AB) oder sonstwie eine Gleichstromspannung angelegt, und zwar so, daß der Minuspol (-) an K, der Pluspol (+) an A liegt. Die Spannung, die etwa 50 Volt, bisweilen aber auch mehrere tausend Volt beträgt, reicht bei weitem nicht aus, um den Abstand zwischen den beiden Elektroden in der Röhre zu überbrücken; es fließt also in der Röhre kein Strom. Wenn man aber an die beiden Enden des Drahtes der Kathode eine kleine Heizbatterie (HB) von z. B. 4 Volt legt, so fängt der Draht an zu glühen, und nun fließt

auch in dem Kreise A-K-AB Strom. Das ist so zu erklären, daß der Draht in glühendem Zustande in der Lage ist, kleine, negativ geladene Teilchen (Elektronen) abzugeben, und diese werden von dem Strome der Anodenbatterie von K nach A getrieben. Die Strecke zwischen A und K ist dann von einem Elektronenstrom durchflossen, der von K nach A geht. In der entgegengesetzten Richtung fließt kein Strom, auch dann nicht, wenn wir die Anodenbatterie umpolen, die Röhre wirkt als „Gleichrichter“.

Bringen wir nun (Abb. 2) zwischen K und A ein Gitter G an, z. B. ein durchlöcheretes Blech oder eine Drahtspirale, die den Heizdraht einschließt, so lagern sich die negativ elektrischen Teilchen, die von K ausgeschleudert werden, auf diesem Gitter ab. Da gleichnamige Elektrizitäten einander abstoßen, so wird diese Gitterladung den von K nach A gehenden Elektronenstrom bremsen, und zwar um so mehr, je stärker die negative Ladung auf dem Gitter ist. Bringt man aber von außen her auf das Gitter eine positive Ladung, so fördert diese den Elektronenstrom von K nach A.

Das Gitter wirkt als Ventil genau so wie der Hahn an einer Wasserleitung. Das Laden des Gitters mit positiver Elektrizität wirkt wie das Öffnen des Hahnes, das Laden mit negativer Elektrizität wie das Schließen des Hahnes. Man sagt: das Gitter „steuert“ den Strom. Solche Gitterröhren sind heute in der Radiotechnik allgemein üblich, in Sendern, Empfängern und Verstärkern, und sie sind wohl vielen Lesern schon gut bekannt.

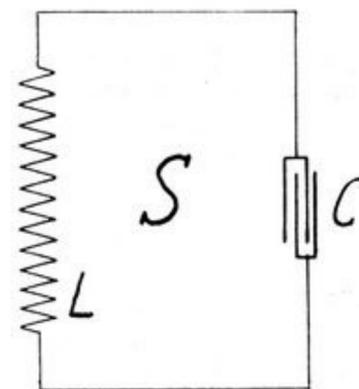


Abb. 3

Zu dem Sender gehört außer der Elektronenröhre noch ein elektrischer Schwingungskreis S (Abb. 3). In einem solchen Kreise, der aus einer Spule L (Selbstinduktion) und einem Kondensator C (Kapazität) besteht, können elektrische Schwingungen hin und her pendeln, ähnlich wie eine Unruh mit Spiralfeder mechanische Schwingungen ausführen kann. Der trägen Masse der Unruh entspricht die Selbstinduktion, und der positiven und negativen Spannung der sich ein- und auswickelnden Spiralfeder entspricht die Kapazität.

Wenn man eine Unruh anstößt, so macht sie Schwingungen, und zwar von ganz bestimmter Schwingungszahl je nach der Wahl der Masse der Unruh und der Spannkraft der Spiralfeder. Diese Schwingung nennt man die Eigenschwingung des Systems. In unserer normalen Taschenuhr wählen wir die Masse der Unruh und die Stärke der Spiralfeder so, daß die Unruh in  $\frac{1}{5}$  Sekunde eine Halbschwingung ausführt. Zu einer ganzen Schwingung (Hin- und Hergang) braucht die Unruh  $\frac{2}{5}$  Sekunden. In einer Sekunde macht die Unruh also  $2\frac{1}{2}$  Schwingungen. Man sagt in der Physik: die Unruh hat eine Eigen-

schwingung mit der Schwingungszahl oder Frequenz von  $2\frac{1}{2}$  Hz (Herz). Die Einheit von einer Schwingung in einer Sekunde trägt den Namen des berühmten Physikers Heinrich Herz, der im Jahre 1888 zuerst elektrische Wellen in der Luft erzeugte und auffing und damit den Grund zu unserer Radiotechnik legte.

Natürlich nimmt bei nur einmaligem Anstoße die Schwingungsweite der Unruh immer mehr ab, weil ihre Schwingungsenergie allmählich durch Reibung verzehrt wird. Wir sagen: die Schwingungen sind „gedämpft“ oder sie „klingen ab“. Dabei bleibt aber die Schwingungsdauer fast vollständig gleich, wie wir ja vom Abzählen der Unruh her wissen.

Wenn wir nun dem schwingenden System ab und zu Energie in geeigneter Form zuführen, so bleibt es in Gang. So erhält z. B. das Hipsche Pendel etwa alle zwei Minuten einen neuen Anstoß in der Richtung seiner Bewegung, nämlich jedesmal dann, wenn seine Schwingungsweite unter eine gewisse Grenze sinkt. Im allgemeinen aber sorgen wir dafür, daß dem schwingenden System bei jeder halben oder ganzen Schwingung eine kleine Energiemenge zugeführt wird. Damit wird der kleine Reibungsverlust gleich wieder aufgefüllt. Es kommt nicht zu einem Abklingen; die Schwingungen sind „ungedämpft“.

Um dies zu erreichen, koppeln wir den schwingenden Körper mit einem Energiespender, dem Federhause. Das Koppelungselement ist die Hemmung, ihre Auslösung erfolgt durch den schwingenden Körper selbst. Die Hemmung nun gibt dem schwingenden Körper aus dem großen Energievorrat des Federhauses jedesmal eine sorgfältig abgemessene kleine Portion Energie ab, sie „steuert“ den Energiefluß.

Die ungedämpften Schwingungen der Unruh wären völlig zeitgleich, wenn sie immer die von uns vorgesehenen Eigenschwingungen des Systems wären. Aber schon die Eigenschwingung der Unruh ist Änderungen unterworfen. Z. B. bewirkt eine Temperaturerhöhung eine Vergrößerung des Trägheitsmomentes der Unruh und eine Erschlaffung der Spiralfeder, wodurch die Eigenschwingung verlangsamt wird. Aber selbst wenn wir diese Änderung ausgleichen, also die Eigenschwingung unverändert erhalten, so entstehen doch noch Störungen, z. B. durch die Koppelung mit der Hemmung. Dadurch wird dem System statt der freien Schwingung eine erzwungene Schwingung aufgeprägt, die etwas von der Eigenschwingung abweicht. Wäre diese Abweichung immer gleich, so würde sie den Gang der Uhr nicht beeinträchtigen; wir könnten sie, wie z. B. auch den Temperaturfehler, in Rechnung setzen. Sie ist aber Änderungen unterworfen, und diese Änderungen verursachen den unkontrollierbaren Fehler im Gange der Uhr.

Diese uns allen wohlbekannten Vorgänge, bei deren Beschreibung wir nur einige Ausdrücke anders gewählt haben, als sie in der Uhrmacherwerkstatt üblich sind, geben ein getreues mechanisches Bild des elektrischen Schwingungsvorganges. Die Masse der Unruh ersetzen wir durch die Selbstinduktion der Spule  $L$ , die Spannkraft der Feder durch die Kapazität des Kondensators  $C$ . Stoßen wir nun dieses schwingungsfähige System elektrisch an, z. B. indem wir für einen Augenblick eine elektrische Spannung anlegen, etwa einen Funken überschlagen lassen, so schwingt das System. Wie wir unsere Unruh durch geeignete Wahl ihrer Masse und der Größe der Spiralfeder auf die gewünschte Schwingungszahl bringen können, so können wir auch den elektrischen Schwingungskreis auf eine gewünschte Schwingungszahl „abstimmen“. Wir machen das, indem wir die Windungszahl der Spulen verändern (entspr. Auswechseln der Unruhschrauben) und

am Drehkondensator drehen (entspr. Verschiebung des Spiralschlüssels oder Ruckers).

In der elektrischen Hochfrequenztechnik ist die Schwingungszahl oder Frequenz im allgemeinen bedeutend höher als in der Uhr. Z. B. haben die Rundfunkwellen eine Frequenz von  $1\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2}$  Mill. Herz. Der Deutschlandsender, der mittags um 1 Uhr das Onogo-Signal gibt, hat eine Frequenz von 183500 Hz. Die Funkstation Nauen gibt das Hamburger Koinzidenz-Signal mit der Frequenz von etwa 16500 Hz. Eine in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) gebaute Quarzuhr, von der wir nachher sprechen wollen, hat einen Röhrensender mit 60000 Hz. Der Bequemlichkeit halber nimmt man bei diesen hohen Frequenzen als Einheit nicht das Herz, sondern  $1000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$  (Kiloherz). Die soeben genannten Frequenzen wären danach 1500 bis 500 kHz; 183,5 kHz; 16,5 kHz; 60 kHz.

Die Erregung durch eine Funkenstrecke, die der Wellentelegraphie den Namen Funkentelegraphie eingebracht hat, ergibt gedämpfte Schwingungen. Sie ist heute auf nur wenige Gebiete der Wellentelegraphie beschränkt. Im Jahre 1912 fand A. Meißner von der Telefunken-Gesellschaft eine bessere Art der Erregung. Als Energiequelle benutzte er die eingangs beschriebene Elektronenröhre, als „Hemmung“ das Gitter. Die

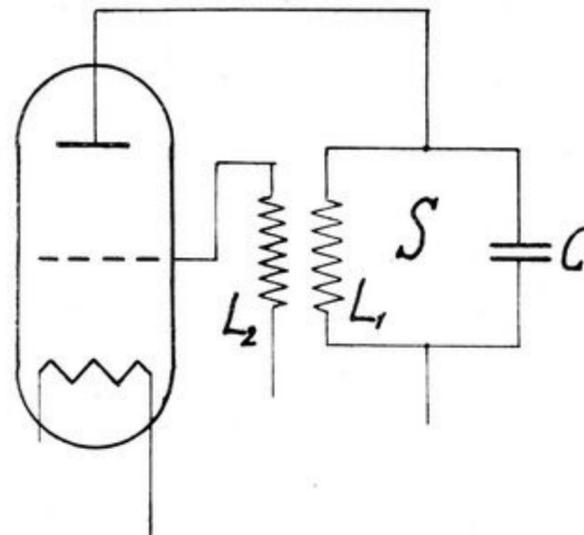


Abb. 4

Schaltung zeigt Abb. 4.  $S$  ist wieder der Schwingungskreis, der in den Anodenkreis eingeschaltet ist. Wenn bei eingeschalteter Heizung der Anodenkreis geschlossen wird, so stößt der Anodenstrom den Schwingungskreis an, und dieser schwingt in seiner Eigenschwingung, jetzt aber nicht mehr gedämpft. Gegenüber der Selbstinduktions-spule  $L_1$  ist nämlich eine zweite Spule  $L_2$  aufgestellt, und diese beiden Spulen wirken wie ein Transformator: Wenn die Elektrizität in der ersten Spule hin und her schwingt, so wird in der zweiten Spule ein Induktionsstrom erregt. Diese zweite Spule befindet sich im Gitterkreise der Röhre, und der in ihr induzierte Strom öffnet und schließt das Gitterventil genau im Tempo der Schwingungen des Schwingungskreises  $S$ . Der Anodenstrom wird stoßweise durch das Ventil durchgelassen und gibt durch seine Stöße immer im richtigen Augenblick eine gewisse Menge Energie an den Schwingungskreis ab. Die Schwingungen behalten ihre Größe genau so wie die unserer Unruh; sie sind ungedämpft.

Wir sehen: der Vergleich mit der Unruh stimmt. Er stimmt aber leider auch noch weiter. Auch bei den elektrischen Schwingungen haben wir eine Art Isochronismusfehler usw., vor allem aber eine Abhängigkeit von der Größe der Antriebskraft. Auch hier strebte man nach einer Art „Hemmung mit konstantem Antrieb“, und man

fand sie in dem schwingenden Quarzkristall, dem Quarzoszillator, von dem wir nun sprechen wollen.

Außer den bekannten Arten der Elektrizitätserzeugung durch Reibung, durch chemische Zersetzung (in Elementen) und durch magnetelektrische Induktion (in Dynamomaschinen) gibt es noch verschiedene andere Arten. Unter ihnen hat die Pyro- und die Piezoelektrizität bis vor kurzem nur im Laboratorium des Physikers eine bescheidene Rolle gespielt. Die Pyroelektrizität = Entstehung elektrischer Ladung auf Kristallen durch Erwärmung und Abkühlung ist schon seit 200 Jahren bekannt. Die mit ihr nahe verwandte Piezoelektrizität, die uns hier angeht, wurde erst vor 50 Jahren von J. und P. Curie einwandfrei nachgewiesen. Es gibt Kristalle, die bei Druck (piezein = drücken) und bei Entlastung elektrische Ladungen bekommen. Bei der Erforschung dieser Eigenschaft haben sich deutsche Gelehrte hervorragend betätigt. Es seien nur genannt Riecke und Voigt und aus neuerer Zeit Giebe und Scheibe. Wichtig ist bei der Piezoelektrizität, daß der Vorgang umkehrbar ist. Wenn man elektrische Ladungen auf einen Kristall bringt, so zieht er sich zusammen oder dehnt sich aus. Bringt man also eine Wechselspannung an ein geeignet geschnittenes Stück eines solchen Kristalles, so wird er gezwungen, mechanisch-elastische Schwingungen zu machen; wie etwa eine belastete Wendelfeder oder eine Stimmgabel.

Kristalle, die diese Eigenschaft zeigen, sind vor allem Turmalin und Quarz. Außerdem seien noch genannt Rohrzucker, Kieselzinkerz, Zinkblende, Natriumchlorat, Seignettesalz, Bittersalz, Zinksulfat, Harnstoff usw.

Beschränken wir uns auf den Quarz, der zur Zeit am meisten benutzt wird. Ohne auf die kristallographischen Verhältnisse des Quarzes (Bergkristall) genauer einzugehen, sei nur bemerkt, daß er in sechsseitigen Säulen und Pyramiden (mit Nebenflächen) kristallisiert (Abb. 5). Die piezoelektrische Eigenschaft zeigt sich nun nicht in der Richtung der Hauptachse *a*, sondern in der Richtung der drei Nebenachsen *b*, die durch die Kanten der sechsseitigen Säule gehen. Deshalb benutzt man nicht einen Kristall so, wie er gewachsen ist, sondern man schneidet aus ihm rechtwinklige Platten oder Stäbchen heraus, von denen ein Flächenpaar senkrecht zu einer der Nebenachsen steht. Das Stäbchen, das in der schon genannten Quarzuhr der PTR benutzt wird, hat die Abmessungen  $91 \times 1,5 \times 3 \text{ mm}^3$ . Von den Abmessungen des Stäbchens hängt — genau wie bei einer Feder oder einer Stimmgabel — die Eigenschwingung ab.

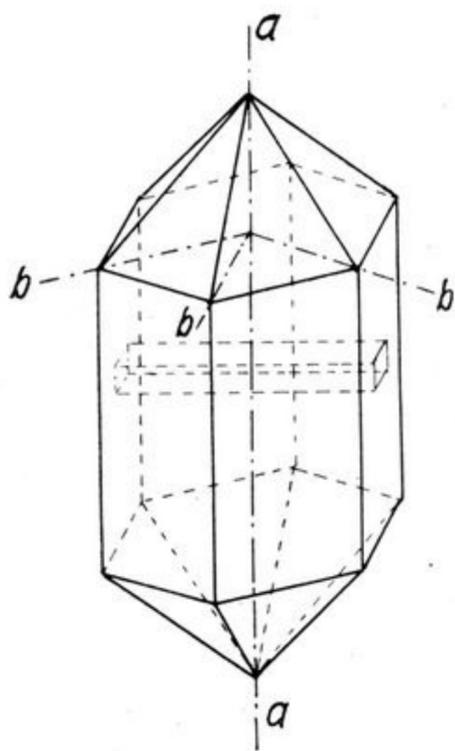


Abb. 5

Wenn man nun einen solchen Kristall *Q* in irgendeiner Weise, z. B. so, wie es Abb. 6 u. 7 schematisch darstellt, mit dem elektrischen Schwingungskreis oder dem Gitterkreis koppelt, so wird die in diesem schwingende Elektrizität ihn zu elastischen Schwingungen anregen, sofern die Erregung der schwingenden Elektrizität genau mit der mechanischen Schwingungszahl des Kristalls übereinstimmt (mit ihr in Resonanz steht). Wenn man nun den

Anodenstrom abschalten würde, so würde der Kristall vermöge der in ihm aufgespeicherten Energie seine Schwingungen (Zusammenziehung und Ausdehnung) noch eine Zeitlang ausführen und nun seinerseits elektrische Schwingungen von genau derselben Schwingungszahl im Schwingungskreis veranlassen. — Wenn in einem anderen Falle aus irgendeinem Grunde die Schwingungszahl des Kreises um einen geringen Betrag von der richtigen abweicht, so schwingt der Kristall in der richtigen Schwin-

gungszahl, die seine Eigenfrequenz ist, weiter und zwingt so den Schwingungskreis, zu der richtigen Frequenz zurückzukehren. So kontrolliert und berichtigt der Quarzoszillator die Schwingungen des elektrischen Schwingungskreises.

Was nun noch kommt, ist grundsätzlich einfach, wenn es auch in der Ausführung noch manche Schwierigkeiten bietet; die in dem Röhrensender erzeugten ungedämpften

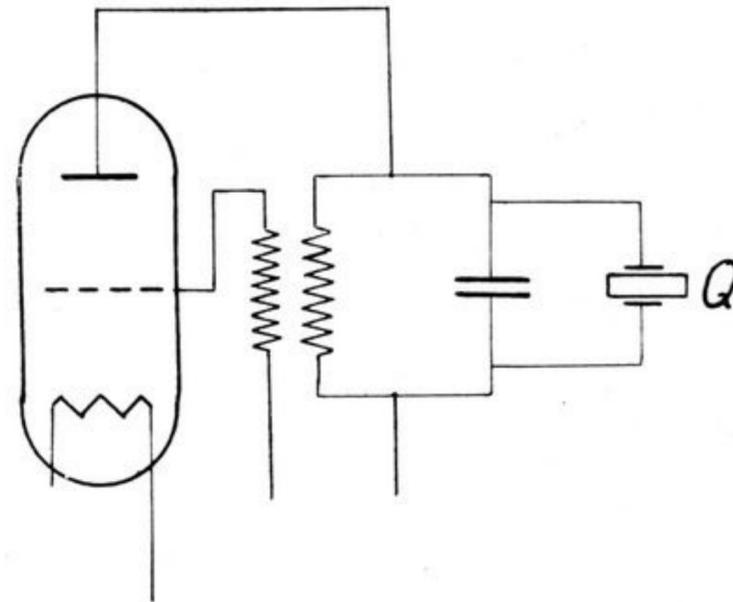


Abb. 6

Was nun noch kommt, ist grundsätzlich einfach, wenn es auch in der Ausführung noch manche Schwierigkeiten bietet; die in dem Röhrensender erzeugten ungedämpften

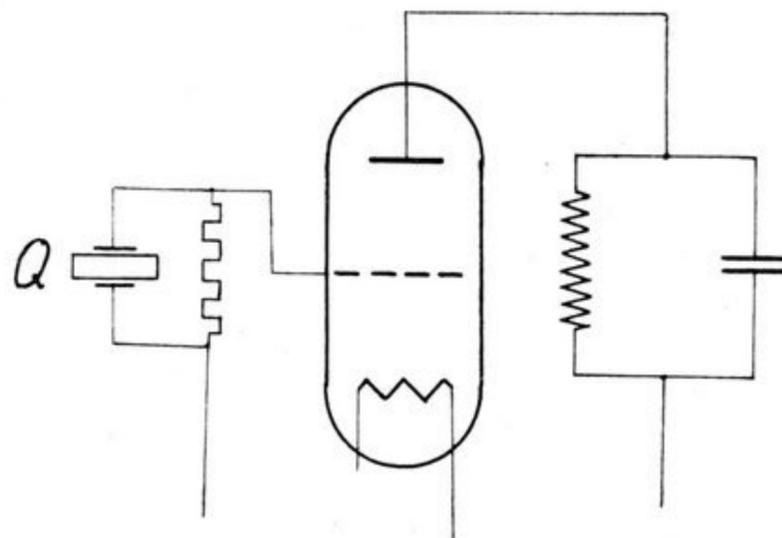


Abb. 7

Schwingungen werden in einigen Verstärkerstufen verstärkt, ähnlich wie das in jedem Rundfunkempfänger mit den in der Antenne aufgenommenen und im Audion ausgesiebteten Telephonströmen geschieht. Der verstärkte Wechselstrom betreibt dann einen Synchronmotor<sup>1)</sup>, der nach einer bestimmten Zahl von Umdrehungen eine Schreibvorrichtung auslöst, die Marken auf dem Streifen eines Chronographen aufschreibt. Diese gestatten dann den Anschluß der Quarzuhr an irgendeine andere Uhr oder

1) Wie man mit einphasigem Wechselstrom Synchronmotoren betreiben kann, wissen wir ja von unseren Synchronuhren her, wie AEG., Siemens, Jundes, Mauthe, Kundo, Laplace usw. Bei all diesen läuft ein Magnet oder ein passender Ersatzmagnet genau in der Frequenz des Wechselstromes um, der den Ständer des Motors umfließt.

an das Nauener Zeitzeichen. — Soviel über den Aufbau der Quarzuhr.

Nun erhebt sich aber die Frage, ob denn die elastischen Schwingungen des Quarzoszillators, der die elektrischen Schwingungen des Röhrensenders kontrolliert und berichtigt, wirklich so gleichförmig sind, oder ob sie nicht doch gewissen Störungen unterworfen sind. Es kommt hier hauptsächlich nur ein Einfluß in Frage, der der Wärme. Bei Erhöhung der Temperatur schwingt der Kristall langsamer. Das macht z. B. bei dem Gerät der PTR für  $1^{\circ}\text{C}$  ein Nachbleiben der Uhr von 0,4 sec im Tage aus. Verlangt man eine Genauigkeit von  $\frac{1}{1000}$  Sekunde im Tage, so muß die Temperatur des Gefäßes, in das der Kristall eingeschlossen ist, auf  $0,002^{\circ}\text{C}$  gleichgehalten werden. Wer einmal mit Thermostaten gearbeitet hat, weiß, was das heißt. Aber es ist heute mit Hilfe sehr empfindlicher Instrumente (Röhrenschuß usw.) möglich.

Nun noch einiges von den Quarzuhren der PTR, über die Scheibe und Adelsberger jüngst in der „Zeitschrift für technische Physik“ 1932, Heft 12, S. 591, einen leider nur sehr kurzen Bericht gegeben haben; einen ausführlicheren Bericht haben sie in Aussicht gestellt. Die Abmessungen des Quarzstäbchens, die Frequenz des Röhrensenders und die Gleichhaltung der Temperatur haben wir schon erwähnt. Nach einer zweifachen Verstärkung wird die Frequenz auf 10 kHz; 1 kHz; 0,333 kHz erniedrigt. Mit dieser Frequenz wird der Synchronmotor betrieben, der 5 Umdr./sec macht und alle 9 sec den Zeitgeber auslöst. — Es sind zwei derartige Uhren hergestellt worden, die nach längerer Versuchszeit im Januar bzw. Februar 1932 in Dauerbetrieb genommen wurden. Der Vergleich der beiden Uhren untereinander und mit

den Zeitsignalen der vier großen Zeitinstitute ergab, daß der unkontrollierbare Fehler der Quarzuhren unter  $\frac{1}{1000}$  Sekunde im Tage blieb. Dieses erstaunlich gute Ergebnis haben die Uhren erzielt, obgleich sie nicht erschütterungsfrei aufgestellt sind (im 2. Stockwerk eines Gebäudes der PTR, das allen Erschütterungen des Straßenverkehrs ausgesetzt ist). Die von den Erbauern festgestellte Genauigkeit der Quarzuhr übertrifft die unserer mechanischen astronomischen Pendeluhren um das Zehnfache und ist etwa die gleiche wie bei dem freien Pendel von Professor Schuler (siehe UHRMACHERKUNST 1929, S. 941), für das eine Genauigkeit von  $\frac{1}{1000}$  bis  $\frac{2}{1000}$  Sekunden im Tage angegeben wird. Vor dieser hat die Quarzuhr den Vorteil, daß sie billiger und unempfindlich gegen Erschütterungen ist. Beide erfordern eine dauernde sachverständige Überwachung, was bei der mechanischen Uhr nicht nötig ist. Auch dürfte die Betriebssicherheit der mechanischen Uhr wegen ihres viel einfacheren Aufbaues bedeutend größer sein. Der schwache Punkt der Quarzuhr ist, daß sie mit Röhren betrieben wird, die ja immerhin nur eine beschränkte Lebensdauer haben. Diesen Nachteil kann man aber dadurch aufheben, daß man in jeder Zeitstation mehrere derartige Uhren unterhält, die regelmäßig miteinander verglichen werden, so daß beim Ausfall einer Uhr die anderen den Zeiddienst weiterführen können.

Zum Schluß erwähnen wir noch, daß der Quarzkristall nicht das einzige Mittel zur Feinsteuerung des Röhrensenders ist. In letzter Zeit scheint man auch gute Erfahrungen mit Stimmgabeln aus Elinvar gemacht zu haben, so daß wir vielleicht demnächst auch von einem mit Stimmgabel gesteuerten Röhrensender hören werden.