

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 25

Artikel: Zeit und Frequenznormale

Autor: Buser, M.S.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916312>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 06.01.2026

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

Zeit und Frequenznormale

Von M. S. Buser, Zürich

529.786

Stabile Generatoren und präzise Zeitmesser haben mit zunehmender Technisierung eine gewaltige Verbreitung erfahren, während der Zeitbegriff selbst und seine Darstellung durch Aufsehen erregende Erkenntnisse mehrfach revidiert werden musste. Heute wird die Frage nach Genauigkeit einer bestimmten Messung immer häufiger auf eine präzise Erfassung von Zeit, oder Frequenz zurückgeführt, und vor allem auf dem Gebiet der Informationsübertragung ist man vermehrt auf präzise Generatoren angewiesen. Die Funktionsweise der wichtigsten Normalgeneratoren, vom Quarzoszillator bis zum Maser und Atomresonator, ist deshalb schematisch erklärt und deren Eigenschaften aufgezählt. Auf die oft fälschlicherweise unter dem Sammelbegriff «Genauigkeit» zusammengefassten Kriterien wird einzeln hingewiesen, und am Beispiel des Quarzgenerators der Zusammenhang zwischen Zeit und Frequenz unter diesem Aspekt dargelegt.

1. Einleitung

Infolge des reziproken Zusammenhangs zwischen Zeit und Frequenz, kann mittels harmonischer Generatoren mit einer Summier- und Anzeigevorrichtung für die inkrementalen Zeitabschnitte ein Zeitmesser gebaut werden. Die Taktgeber können hiebei auf folgenden vier Grundprinzipien beruhen:

a) *Mechanisch*. Trägheitsmoment und -Rückstellkraft bestimmen die Frequenz eines periodisch bewegten Körpers (Pendel, Unruh, Federpendel). Die Verluste des Schwingers werden aus einem Energiespeicher (Gewicht, Federwerk) durch Zufuhr mechanischer Arbeit gedeckt.

b) *Elektromechanisch*. Statt äußere Kräfte bestimmen die elastischen Eigenschaften eines schwingfähigen Körpers, die Frequenz, wobei die Verluste unter Anwendung des Wandlerprinzips mit elektrischen Mitteln gedeckt werden (Piezoelektrische-, magnetostruktive Schwingen, Stimmgabeln).

c) *Elektrisch*. Frequenzbestimmend sind die Zeitkonstanten elektrischer Gebilde und die Verluste werden durch aktive Teile ersetzt (RC-, LC-Oszillatoren).

d) *Quantenmechanisch*. Energetische Phänomene in der Atomstruktur bestimmen die Frequenz, während durch Zufuhr von Licht-, Wärme-, oder Hochfrequenzenergie die entsprechenden Vorgänge ausgesucht oder aufrecht erhalten werden.

e) Die unbedeutende Gruppe nichtperiodischer Zeitmesser, wie Sand- und Wasseruhren, sei hier nicht berücksichtigt.

Die Bestrebungen beim Bau von Zeitmessern laufen nun darauf hinaus, möglichst unabhängig von äusseren Einflüssen, eine feine äquidistante zeitliche Maßstabteilung zu generieren. Als Referenzmaßstab gilt die periodische Wiederkehr zeitlich

Par suite des progrès de la technique, les générateurs stables et les chronomètres précis ont été très largement répandus, cependant que la notion-même du temps et sa représentation ont subi plusieurs révisions à la suite de découvertes sensationnelles. La précision requise d'une certaine mesure se ramène actuellement toujours plus fréquemment à une conception précise du temps ou de la fréquence, et c'est plus particulièrement dans le domaine de la transmission d'informations que l'on ressent sans cesse davantage la nécessité de disposer de générateurs précis. C'est la raison pour laquelle le fonctionnement des générateurs courants les plus importants est expliqué d'une manière schématique en énumérant leurs propriétés. Les critères se rapportant souvent à tort à la notion générale de «précision» sont traités individuellement, cependant que la relation du temps à la fréquence est illustrée sous cet aspect en se référant à titre d'exemple au générateur à quartz.

als invariant geltender astronomischer Vorgänge, deren Einheit die Ephemeridensekunde darstellt [1]¹). Dieser Aufsatz soll neben einer Aufzählung der geeigneten Generatoren auf einige Probleme des Frequenz- und Zeitvergleichs hinweisen.

2. Normalgeneratoren

Zur Erzeugung einer brauchbaren Zeitskala benötigt man Generatoren, die über eine längere Zeitspanne eine konstante Frequenz abgeben können, oder deren Frequenz-Zeitfunk-

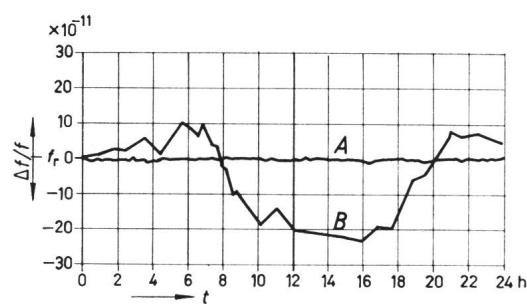


Fig. 2
Stabilität von Quarzgeneratoren

Frequenzschwankungen im Laufe eines Sommertages bei einer jeweiligen Messzeit von 10 min

A neueres Modell mit einem AT-Quarz in Doppelofen; B älteres Modell mit Längsschwinger in einem einfacheren Thermostaten. Der Verlauf von B ist auf den Temperatureinfluss zurückzuführen (direkte Sonnenbestrahlung am Morgen)

tion zumindest voraussagbaren Gesetzen folgt. Schon 1934 wurden Quarzoszillatoren gebaut, deren Stabilität ausreichte, um Unregelmässigkeiten der Erdrotation nachzuweisen. [Die Vergleichsmessungen von Scheibe und Adelsberger zwischen Sternzeit und Quarznormalen führten 1936 zur Neudeinition der Normalsekunde als Einheit von UT₂²].

Mit Stabilität bezeichnet man die Abweichungen der Frequenz gegenüber einer festen Bezugsbasis. Als Kriterien gelten die spektrale Reinheit der Frequenz (Fig. 1), die kurz- und langzeitigen Abweichungen gegenüber einem ausgeglichenen Frequenzmittelwert (Fig. 2) und die langzeitige, Drift genannte, monotone Abwanderung dieses Mittelwerts (Fig. 3).

Als Bezugsbasis gilt seit 1964 die Transitfrequenz von Cs¹³³ (Caesium) unter festgelegten Bedingungen. Der von einem solchen Cs-Normal etablierte Zeitmaßstab hat sich in jahrelangen

¹) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

²) UT₂ Universalzeit, abgeleitet von der ausgemittelten Erdrotation [1].

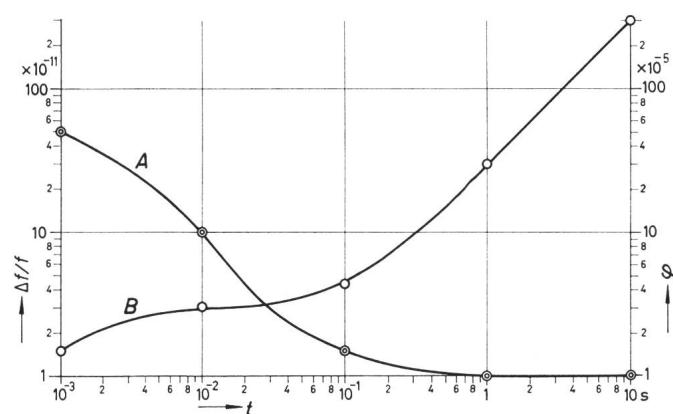


Fig. 1
Kurzzeitverhalten von Quarzgeneratoren

A quadratischer Mittelwert (RMS) der relativen Frequenzabweichung $\Delta f/f$; B RMS-Phasenabweichung φ (im Bogenmaß) eines typischen Quarznormals in Funktion der Messdauer t

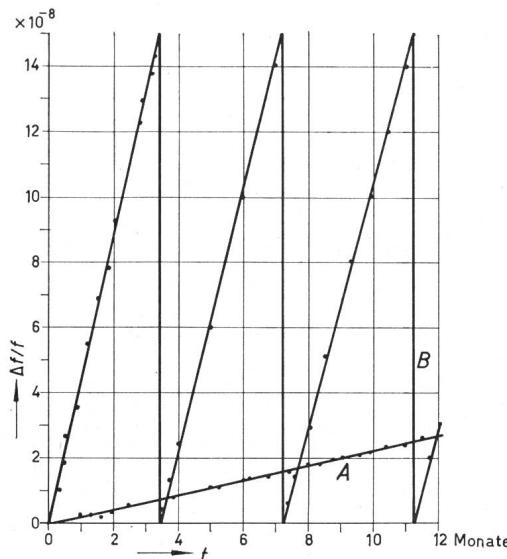


Fig. 3
Frequenzdrift von Quarzgeneratoren

A neueres Modell mit einer Driftrate von $D \approx 7 \cdot 10^{-11}/\text{Tag}$; B älteres Modell mit $D \approx 1,5 \cdot 10^{-9}/\text{Tag}$

Vergleichen als mit demjenigen identisch erwiesen, der von der Beobachtung ausgeglichen periodischer Vorgänge in der Astronomie abgeleitet werden konnte. Auf diese Sekunden-Einheit bezogen, beträgt die Cs^{133} -Frequenz

$$f_{\text{Cs}^{133}} = 9192\,631\,770 \text{ Hz}$$

Generatoren, die gewisse minimale Stabilitäten besitzen, nennt man Frequenznormale, wobei zwei generell verschiedene Gruppen zu unterscheiden sind:

a) Beim *Primärnormal* besitzt die Frequenz inhärent einen bestimmten Wert, der nicht weiter abgeglichen werden muss und kann. Es wird lediglich eine Kalibrierung benötigt. Die meisten, aber nicht alle Atomnormale sind primärer Natur und gehören zu den stabilsten Generatoren, die hergestellt werden können.

b) Als *Sekundärnormale* bezeichnet man Generatoren beliebig hoher Stabilität, deren Frequenz jedoch kontinuierlich von Herstellungsparametern beeinflusst wird. Unabhängig voneinander hergestellte Geräte besitzen deshalb verschiedene Frequenzen, sodass ein Abgleich oder eine Eichung gegenüber einem Primärnormal erforderlich ist.

3. Quarzgenerator als klassisches Sekundärnormal

Mit zunehmender Entwicklung der Nachrichtenübertragung und der Messtechnik sind die Qualitätsanforderungen und der Bedarf an präzisen und stabilen Generatoren stark gewachsen. Wenn sich auch in Zukunft das Verhältnis zugunsten des Atomnormals verschieben wird (siehe Abschnitt 5), so kommt doch dem Quarzgenerator vor allem aus wirtschaftlichen Gründen heute die grösste Bedeutung zu.

Quarzgeneratoren können den Anforderungen entsprechend mit verschiedener Präzision und Frequenz gebaut werden. Die Größenordnung der Fehlertoleranzen, die unter Berücksichtigung äusserer und innerer Störeinflüsse in 24 h nicht überschritten werden, liegt innerhalb 10^{-4} bis 10^{-11} für den Relativfehler $\Delta f/f$. Der herstellbare Frequenzbereich beginnt bei wenigen hundert Hz und reicht bis weit in den MHz-Bereich. Das Gebiet von 1...10 MHz für harmonische AT-Schwinger³⁾ erwies sich für Generatoren höchster Präzision als optimal (Fig. 5).

³⁾ AT Quarzschnitt in bestimmter Lage zu den Kristall-Achsen (s. Fig. 7).

Die technologischen Probleme, sowie der Schaltungsaufwand halten sich in einem überblickbaren Rahmen. Die Halbleitertechnik hat dazu beigetragen, dass Gewicht, Volumen und Leistungsbedarf drastisch vermindert, die Lebensdauer jedoch gleichzeitig auf etliche Jahrzehnte gesteigert werden konnte. Aus der Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten seien einige Beispiele herausgegriffen:

a) Frequenzkontrolle in der Informationsübertragung. Stabilisierung von Rundfunk- und Fernsehsendern, Zuteilung von Übertragungs- und Sprechkanälen bei Mehrwellenbetrieb, Kanalzuteilung bei Frequenz- und Zeitmultiplexverfahren, Stabilisierung von Mikrowellensendern im Satellitenfunk, wo im GHz-Bereich Bandbreiten von wenigen Hz und deshalb eine hohe Stabilität gefordert werden, um bei kleinen Empfangsleistungen ein günstiges Signal/Rauschverhältnis zu erhalten.

b) Erstellung von Zeitbasen von Uhren und auf Zeitmessung beruhenden Messgeräten wie Geschwindigkeits-, Drehzahl- und Intervall- oder Frequenzmessgeräten. Die in einem schmalen Band mögliche Verschiebbarkeit der stabilen Quarzfrequenz (Ziehen) führt zur Anwendung in der Mikrowellen-Spektroskopie und vor allem bei Atomnormalen, wo Quarzgeneratoren über eine Regeleinrichtung in Synchronismus mit atomaren Resonanzerscheinungen gehalten werden.

3.1 Der Quarzschwinger

Diesem Umfang entsprechend, den Quarzgeneratoren heute einnehmen, sei hier das Prinzipielle kurz angedeutet, während für die exakten Zusammenhänge auf die grundlegende Literatur verwiesen wird [2; 3].

Mit Körpern aus Quarz = SiO_2 = Bergkristall können auf Grund des reziproken Piezo-Effekts elektrisch angeregte, mechanische Resonatoren gebaut werden, die sich infolge der Rückwirkung wie Schwingkreise verhalten. Das Ersatzschaltbild für einen bestimmten Schwingmodus zeigt Fig. 4. Der erreichbare Gütefaktor $Q = \omega L/R$ beträgt bis zu einigen 10^6 . Der limitierende Faktor ist durch den Verlustwiderstand R symbolisiert, der für die Umwandlung mechanischer und elektrischer Energie in Joulesche Wärme verantwortlich ist. (Elastische Hysterese, Phonon-Phonon-Verluste [4], Verluste in Elektroden, Halterung und Zuleitung sowie Widerstandsverluste bei sehr dünnen Elektroden.)

Der Quarzschwinger wird in Knoten seiner Eigenschwingung gelagert und durch aufgedämpfte Metallelektroden angeregt, wobei unter Ausnutzung des Piezoeffektes als gerichteter Grösse und der inneren Kopplung je nach Anwendung und Frequenzbereich bestimmte Modi bevorzugt werden (Fig. 5).

In Wirklichkeit ist das Ersatzschaltbild in Fig. 4 nur für einen bestimmten Schwingmodus zulässig, doch können zu folge der elektrischen und mechanischen Kopplung je nach Geometrie und Lage des Schnittes zu den Kristallachsen verschiedene Nebenresonanzen auftreten. Es ist eine Optimierungsaufgabe der Quarzhersteller durch entsprechende Formgebung, Orientierung und Metallisierung (Energy Trapping [5]) das gewünschte Verhalten zu erreichen.

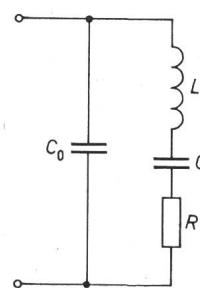


Fig. 4
Quarz-Ersatzschaltung

gültig für einen bestimmten Schwingmodus
 L , C äquivalente Größen für Serieresonanz mit Verlustwiderstand R ; C_0 Schaltungskapazität, evtl. Ziehtrimmer (liefert bestimmte Parallelresonanz). Für steilen Impedanzverlauf werden beide Resonanzfrequenzen einander angenähert.

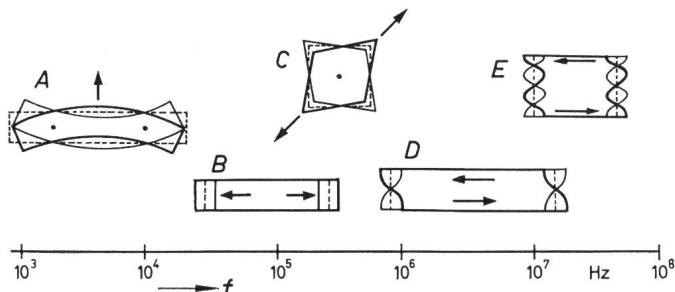
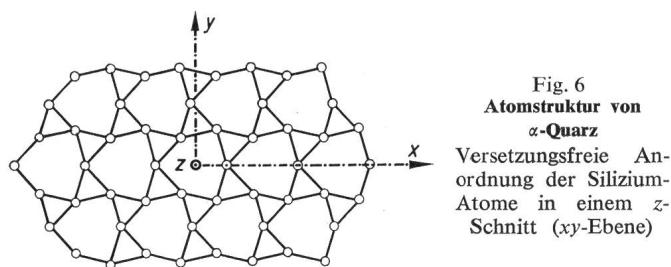


Fig. 5
Schwingquarze

A Biegeschwinger, 1...50 kHz; B Längsschwinger, 50...200 kHz; C Flächenschwinger, 150...800 kHz; D Dickenscherer (Grundwelle), 0,5...20 MHz; E Dickenscherer, 3. Oberwelle 10...60 MHz, 5. Oberwelle 60...100 MHz, 7. Oberwelle 100...150 MHz

3.2 Einflüsse auf die Frequenzstabilität

Die gute chemische und mechanische Beständigkeit von Quarz, sowie der hohe Q -Faktor, lassen Kreise stabiler Frequenz und geringer Bandbreite erwarten. Die richtungsabhängige Variation der frequenzbestimmenden Parameter (Ausdehnungskoeffizient, E-Modul, dielektrische Konstante) mit der Temperatur führt jedoch zu einem temperaturabhängigen Frequenzverhalten. Die regelmäßige Atomstruktur von α -Quarz (Fig. 6) zeigt im Gegensatz zu amorphen Konfigura-



tionen einen je nach kristallographischer Richtung verschiedenen Temperaturkoeffizienten (TK) (Fig. 7, 8). Glücklicherweise erlaubt das Vorhandensein positiver, als auch negativer TK gewisse Orientierungen, bei denen der aus den einzelnen Anteilen sich ergebende Gesamt-TK bei einer bestimmten Temperatur θ_0 verschwindet. Für derartige Kristallschnitte lässt sich die Abhängigkeit der Schwingfrequenz f von der Temperatur θ als Polynom dritter Ordnung darstellen.

$$f = f_0 [1 + a_2(\theta - \theta_0)^2 + a_3(\theta - \theta_0)^3]$$

θ_0 und f_0 Temperatur und Frequenz bei TK = 0.

Die meisten Schnitte zeigen einen parabolischen, durch die Konstante a_2 bestimmten Frequenz/Temperaturverlauf. Eine

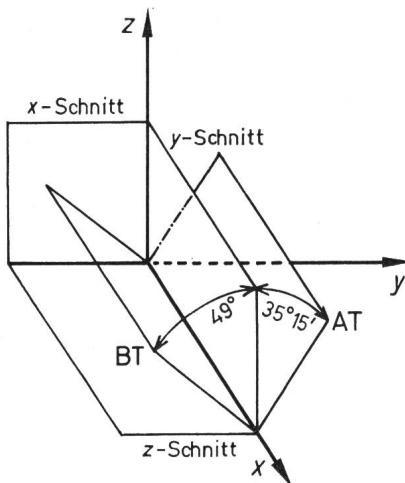


Fig. 7
Schnittwinkel von
Oszillator-Quarzen

Beispiele: AT, BT. Der AT-Schnitt wird für die heutigen Präzisionsnormale verwendet

Ausnahme bildet der AT-Schnitt, der mit $a_2 = 0$ einen von $a_3 \neq 0$ bestimmten Verlauf zeigt (Fig. 8). Der angegebene Schnittwinkel von $35^{\circ}17'$ muss bei der Fabrikation sehr genau eingehalten werden, da schon eine Verdrehung aus dieser Lage um $\pm 3'$ einen zusätzlichen Temperaturgang von $\pm 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ zur Folge hat. Hieraus wird ersichtlich, dass für stabile Generatoren der Quarz auf konstanter Betriebstemperatur θ gehalten werden muss und zwar in dem Punkt, wo $df/d\theta = 0$. Die vom Aufwand an Stabilisierungsmassnahmen abhängige Frequenzabweichungen pro Tag für Zimmertemperatur zeigt Fig. 9, während Fig. 10 den prinzipiellen Aufbau eines Doppelthermostaten für Präzisionsnormale darstellt.

Des weiteren wird das Frequenzverhalten von Verunreinigungen im Quarz selbst (Wasserstoff und Alkali-Ionen [6]) oder im Quarzgehäuse beeinflusst (Umlagerungs- und Diffusions-

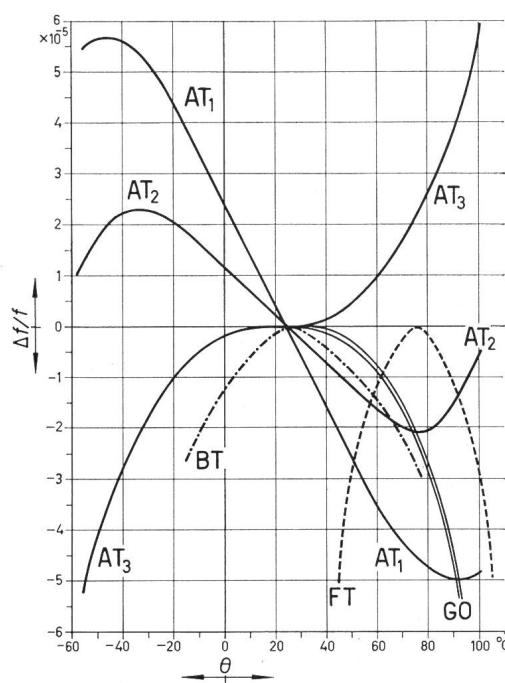


Fig. 8
Temperaturabhängigkeit der Frequenz von Quarz

BT, FT Schnitte mit parabolischem Frequenzverlauf; AT₁, AT₂, AT₃ Temperaturverhalten von AT-Schnitten mit verschiedenen Schnittwinkeln; GO Geometrischer Ort für TK = 0 von AT-Schnitten in Abhängigkeit vom Schnittwinkel

prozesse). Durch die mechanische Bearbeitung hervorgerufene Trümmer- und Zwillingsbildung an der Oberfläche ist ebenfalls zu vermeiden, weshalb die meist plakonvexen AT-Schnitte der heutigen Präzisionsnormale geschliffen, geläppt, poliert, geätzt und sorgfältig unter Vakuum in ausgeglühte Gefäße verpackt werden.

3.3 Alterung

Das trotzdem noch beobachtbare und keineswegs geklärte Phänomen der zeitabhängigen Frequenzwanderung wird unter dem Sammelbegriff «Alterung» zusammengefasst [10]. Diese manifestiert sich nach einer gewissen Einlaufzeit als monotoner Anstieg der Funktion $\Delta f/f(t)$. Der Anstieg ist meist positiv und linear und wird mit Drift bezeichnet. Von der demzufolge konstanten Driftrate, meist als $\Delta f/f$ pro Tag angegeben, wird später noch die Rede sein. Erreichbare Werte liegen um $\Delta f/f = 10^{-11}/\text{Tag}$. Dieses typische Langzeitverhalten wird in Fig. 11 illustriert, deren Daten aus Langzeitver-

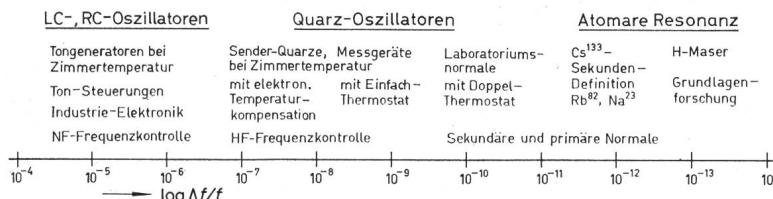


Fig. 9
Genauigkeitsklassen von Generatoren

suchen an den beiden Normalen des Institutes für Fernmelde-technik der ETH gewonnen wurden.

Wie aus dieser Figur ebenfalls ersichtlich ist, werden Drift-rate und Einlaufzeit, und über den Umweg des Temperaturgradienten im Quarz auch die Stabilität von der Antriebsspannung und damit von der Verlustleistung beeinflusst. Die Quarze stabiler Normale werden aus diesem Grunde bloss mit sehr kleinen Verlustleistungen P_v betrieben [7].

$$P_v \text{ typ.} = 10^{-7} \text{ W}$$

Hiedurch wird natürlich das Signal/Störspannungsverhältnis verschlechtert, da der nötige Mehraufwand an Verstärkung

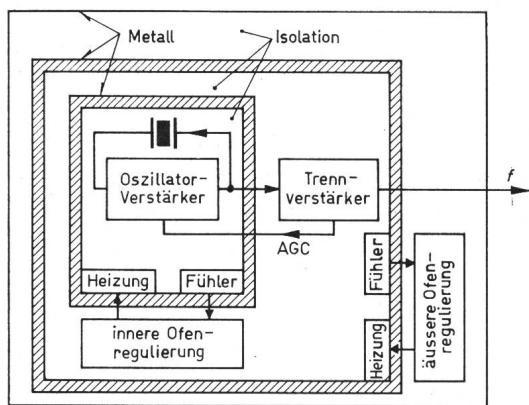


Fig. 10
Doppelofen zur Konstanthaltung der Temperatur eines Präzisions-Quarz-normals auf dem Umkehrpunkt des Quarz-TK

Die Heizleistung beider Gefäße wird proportional geregelt

zusätzliche Rauschquellen mit sich bringt. Die Addition des Rausch- zum Nutzsignal bewirkt eine Phasenmodulation, d. h. eine spektrale Verbreiterung des Ausgangssignals [8, 9], die sich allerdings mit einem Quarzfilter wieder reduzieren lässt

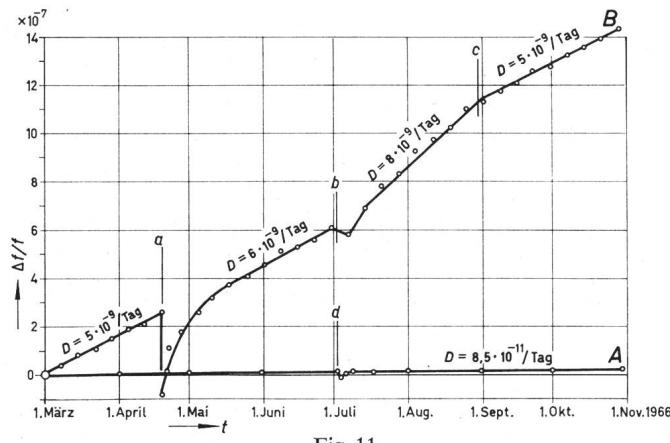


Fig. 11
Drift zweier Quarzgeneratoren

A neues Modell mit AT-Schwinger in Doppelofen; B älteres Modell mit Längsschwinger in Thermostat; a Netzunterbruch (ca. 3 h); b Betrieb des Quarzes mit doppelter Verlustleistung; c Betrieb mit normaler Verlustleistung; d Oszillator für 1 h abgeschaltet, Ofen jedoch in Betrieb gelassen

(Fig. 12). In welchem Umfang nicht quarzeigene Faktoren stabilitiesbestimmend sind, geht aus folgender Überlegung hervor:

Betrachtet man die Oszillatorschaltung als über den Quarz als Schwingkreis rückgekoppelten Verstärker, so ergibt sich mit dem Gütefaktor Q des Quarzes eine Frequenzverschiebung $\Delta f/f$, wenn die Phase des Verstärkers um φ (im Bogenmass) geändert wird:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2\varphi}{Q\pi}$$

oder

$$\varphi = \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{Q\pi}{2}$$

Wird z. B. verlangt, dass die Frequenzstabilität 10^{-10} betragen soll, so darf die durch äußere Einflüsse wie Spannungs-, Temperatur- und Lastschwankungen im Verstärker hervorgerufene Phasenänderung den Betrag von $2\pi \cdot 10^{-4}$ nicht übersteigen (entspricht $0^0 2' 10''$!).

3.4 Zeitfehler; Quarzuhren

Da Quarzgeneratoren mit Teilerschaltungen häufig als Zeitnormale verwendet werden, seien noch folgende Zusammenhänge dargelegt:

Die Kurzzeitstabilität kommerzieller Präzisionsgeneratoren ist recht gut (bei 1 s Beobachtungsdauer besser als 10^{-11}).

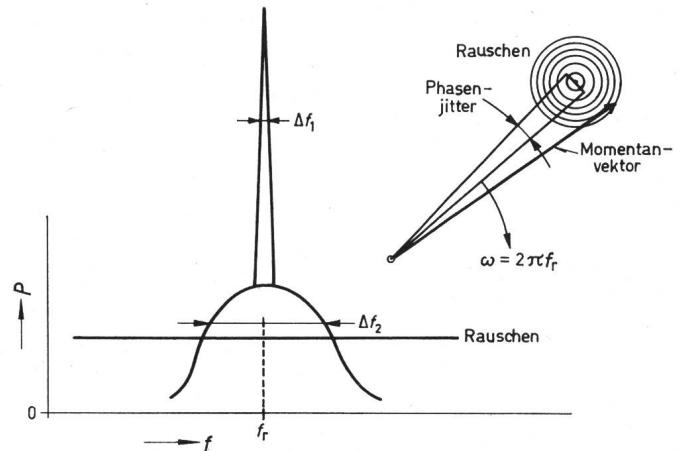


Fig. 12
Spektrum eines Quarzgenerators

Δf_1 niederfrequentes Phasenzittern (Jitter), bei Präzisionsgeneratoren um 0,2 Hz Bandbreite; Δf_2 Bandbreite des Schmalbandrauschen, herührend von weissem Rauschen, durch Quarzfilter am Ausgang limitiert; f_r Zentrumsfrequenz; P Ausgangsleistung des Generators

Auch der Temperatureinfluss ist gering (typisch: $10^{-11}/^{\circ}\text{C}$), während zwischen Kurzschluss und Leerlauf am Ausgang Schwankungen in derselben Größenordnung hervorgerufen werden. Dominant bleibt somit nur noch der Einfluss der Drift oder Alterung [10], doch kann der hiedurch entstehende Zeitfehler mit periodischen, berechenbaren Korrekturen in vorgeschriebenen Grenzen gehalten werden. Voraussetzung ist eine konstante Driftrate D , die nach Richtung und Betrag durch vorgängige Messungen bestimmt wurde:

$$\frac{\Delta f}{f} = \text{const} \cdot t = D t$$

$$[D] = \frac{\Delta f}{f} / \text{Tag}, \text{ meist positiv}$$

Fig. 13 zeigt diesen linearen Frequenzzuwachs. Es gilt die Geradengleichung:

$$f_1 = f_0 + D f_r (t_1 - t_0)$$

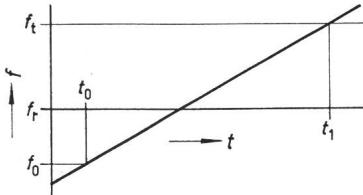


Fig. 13
Frequenzverhalten bei
 $D = \text{konstant}$
 f_r Referenzfrequenz;
 f_0 Oszillatorkonstante bei t_0 ;
 f_t Oszillatorkonstante bei t_1

oder wenn vereinfachend $t_0 = 0$, $t_1 = t$ und die Frequenz bei t mit f_t statt f_1 bezeichnet wird:

$$f_t = f_0 + D f_r t \quad (1)$$

Die Zeitdifferenz zwischen den Periodendauern von f_r und f_t zur Zeit t beträgt:

$$a = \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t}$$

In einem kleinen Zeitabschnitt Δt befinden sich $\Delta t f_t$ Perioden und damit auch Zeitfehler a , sodass der in diesem Zeitabschnitt aufgelaufene Zeitfehler ΔT folgendermassen lautet:

$$\Delta T = \left(\frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t} \right) f_t \Delta t$$

Der Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$ liefert das Differential des Zeitfehlers:

$$dT = \left(\frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_t} \right) f_t dt = \left(\frac{f_t}{f_r} - 1 \right) dt$$

Die Integration liefert den Zeitfehler T :

$$T = \int \frac{f_t}{f_r} dt - \int dt$$

Mit Gl. (1) eingesetzt:

$$T = \int \frac{f_0 + D f_r t}{f_r} dt - \int dt = \int \frac{f_0}{f_r} dt + \int D t dt - \int dt$$

und integriert:

$$T = \frac{f_0}{f_r} t + \frac{D t^2}{2} - t + C$$

Zur Zeit $t_0 = 0$ entspricht die Integrationskonstante C dem anfänglichen Zeitfehler T_0 :

$$T = T_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) t + \frac{D t^2}{2} \quad (2)$$

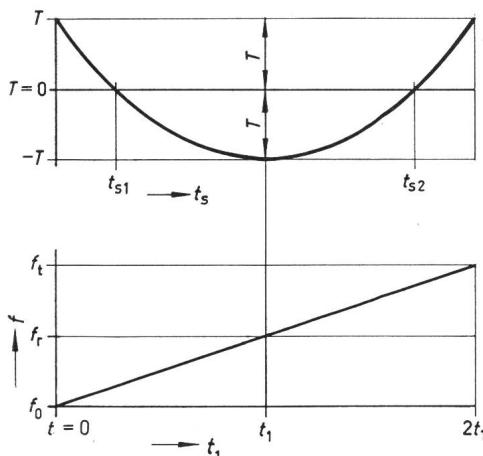


Fig. 14

Frequenzverhalten für limitierten Zeitfehler bei konstanter Driftrate D
 $\pm T$ zugelassene Zeitabweichung im Intervall $t_0 \dots 2t_1$; f_r Referenzfrequenz; f_0 Oszillatorkonstante bei $t=0$; f_t Oszillatorkonstante bei $2t_1$; t_1 Zeitpunkt für Frequenz-Synchronismus; t_{s1} , t_{s2} Orte für Zeitabweichung $T=0$

Der gesamte Zeitfehler am Beobachtungspunkt t ist somit von folgenden Faktoren abhängig:

T_0	ursprünglicher Zeitfehler
f_0/f_r	Frequenzablage am Anfang
$t = t_1 - t_0$	Beobachtungsdauer
D	Driftrate des Oszillators

Soll nun eine Uhr mit einem Generator bekannter konstanter Driftrate in einem bestimmten Zeitintervall $2t_1$ den Zeitfehler von $\pm T$ gegenüber einem Normal der Referenzfrequenz f_r nicht überschreiten, so lässt sich die Zeit bis zur nächsten nötigen Frequenzkorrektur aus Symmetriegründen (Fig. 14) einfach bestimmen. Die aus Fig. 14 abzuleitenden Werte in Gl. (2) eingesetzt liefert:

$$2T_0 + \left(\frac{f_0}{f_r} - 1 \right) t_1 + \frac{D t_1^2}{2} = 0 \quad (3)$$

mit den beiden Unbekannten f_0 und t_1 . Die erste Ableitung von Gl. (2) kann aber geschrieben werden:

$$\frac{dT}{dt} \Big|_{t_1} = 0 = \frac{f_0}{f_r} - 1 + D t_1$$

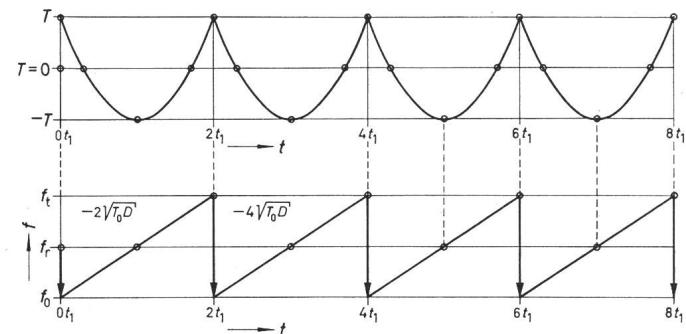


Fig. 15
Regelplan für begrenzte Zeitfehler $\pm T$

Für Zeit- und Frequenzkorrekturen bei t_0 siehe Erläuterungen im Text

oder

$$\frac{f_0}{f_r} = 1 - D t_1 \quad (4)$$

Gl. (4) in Gl. (3) eingesetzt und nach t_1 aufgelöst, liefert:

$$t_1 = 2 \left(\frac{T_0}{D} \right)^{1/2} \quad (5)$$

oder für die Zeit bis zur nächsten nötigen Frequenzverschiebung:

$$2t_1 = 4 \left(\frac{T_0}{D} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Gl. (4) nach f_0 aufgelöst und darin t_1 aus Gl. (5) eingesetzt, liefert die ursprünglich nötige Frequenzablage gegenüber der Referenzfrequenz f_r :

$$f_0 = f_r [1 - (4 T_0 D)^{1/2}] \quad (7)$$

Ein praktisches Beispiel mit folgenden Daten liefert die nachstehenden Resultate, mit denen sich nach Fig. 15 der Zeitfehler durch periodische Korrekturen dauernd in den Schranken $\pm T$ bewegt.

Gegeben sind die D Driftrate = $+10^{-10}$ pro Tag bei der Nennfrequenz $f_r = 5$ MHz ($\pm T$, d.h. der Betrag der Zeitabweichung soll 1 ms = 10^{-3} s nicht überschreiten).

Gesucht sind, da $T_0 = +T$, der Frequenz-offset f_0/f_r und die Dauer $2t_1$ bis zur nächsten Frequenzverstellung.

$$2t_1 = 4 \frac{10^{-3} \text{ s}}{10^{-10} / 86,4 \cdot 10^3 \text{ s}} = 37,2 \cdot 10^5 \text{ s} = 43 \text{ d } 1 \text{ h } 20 \text{ min}$$

$$f_0 = 5 \text{ MHz} (1 - 43/2 \cdot 10^{-10})$$

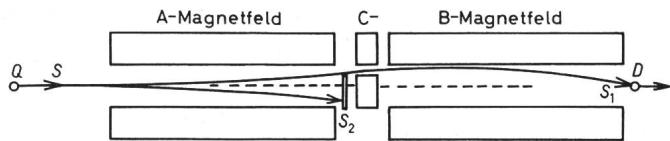


Fig. 16
Atomstrahl-Resonator

Q Atome emittierende Quelle; S Strahl mit Atomen der Zustände W_1 und W_2 ; A, B statische Magnetfelder zur Trennung von Atomen mit W_1 oder W_2 in verschiedenen Bahnen; C Feld mit der Transitfrequenz $W_1 \longleftrightarrow W_2$; D Atomdetektor

Die Konstanz der Driftrate kann auf Grund der Tatsache kontrolliert werden, dass an zwei Stellen t_{s1}, t_{s2} der Zeitfehler $T(t)$ zu null wird.

$$t_{s(1,2)} = t_1 \left(1 \mp \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad (8)$$

Des weiteren gilt die triviale Tatsache, dass bei $t = t_1$ $f = f_0$ ist.

4. Atomnormale

Die einer energetischen Zustandsänderung eines Atoms zugehörige Transitfrequenz f wird bei diesen Normalen zur Ableitung einer hochstabilen Frequenz benutzt. Nach den Erkenntnissen der Quantentheorie kann der Energiezustand eines Atoms nur ganz bestimmte diskrete Werte annehmen, sodass auch eine Energiedifferenz entsprechend dem Zusammenhang

$$f = \frac{W_2 - W_1}{h}$$

einer bestimmten diskreten Frequenz entspricht (h = Plancksche Konstante).

Es lassen sich zur Ausnutzung dieses Gesetzes verschiedene Prinzipien unterscheiden, deren Technologie sich heute teilweise überschneidet. An dieser Stelle sei bloss eine vereinfachte Darstellung wiedergegeben, während im übrigen auf die gute Zusammenfassung von *Beehler* mit reicher Literaturangabe hingewiesen sei [11].

4.1 Atomstrahltechnik

Die Grundlagen wurden durch die Experimente von *Zee-man, Dunoyer, Stern, Gerlach* [12] u.a.m. geliefert, die darauf abzielen, genauere Kenntnisse über atomare und molekulare Energiestrukturen zu erhalten.

Die Quantisierung des magnetischen Dipol-Moments eines Atoms hat zur Folge, dass ein Quellenstrahl S durch ein stationäres Magnetfeld A in Teilstrahlen S_1 und S_2 mit Atomen des Energiezustandes W_1 und W_2 aufgespalten wird (Fig. 16). Mit einem zweiten Magnetfeld B kann z.B. der Strahl S_1 auf einen Atomdetektor geleitet werden, derweil der unerwünschte Strahl S_2 durch ein Hindernis in der C -Region abgefangen wird. Legt man an dieser Stelle ein auf den verbleibenden Strahl S_1 wirkendes Wechselfeld an, dessen Frequenz f der Transitfrequenz

$$f_1 = \frac{W_2 - W_1}{h}$$

entspricht, so gehen die Atome des S_1 -Strahls in den Zustand W_2 über, werden im B -Feld anderst abgelenkt und verfehlten demzufolge den Detektor D . Ein Atomnormal nach diesem Prinzip umfasst also nach Fig. 17 einen Quarzoszillatoren mit nachfolgendem Vervielfacher, dessen Ausgangsfrequenz $\approx f_1$ beträgt, und der über ein Regelsystem laufend auf das scharfe Maximum des Detektorsignals und damit genau auf f_1 eingeregelt wird.

Das Cs^{133} -Normal, oft auch Cäsium-Atomuhr genannt, (wenn dementsprechende Frequenzteiler zur Zeitanzeige angelassen sind) arbeitet nach diesem Prinzip. Gemessen an der Ephemeridensekunde besitzt es eine Resonanzfrequenz von $f_1 = 9192631770$ Hz, die seit 1964 die Definition der Atomsekunde als invariante Zeiteinheit bildet [1; 13]. Die Resonanzbandbreite wurde mit Labornormalen bis auf 20 Hz reduziert, was einer Kreisgüte von $Q = 4 \cdot 10^8$ entspricht [14]. Die erreichbare Frequenzunsicherheit beträgt etwa 1 $\mu\text{s}/\text{Tag}$ oder 10^{-11} (entsprechend dem Einfluss des Quarzoszillators und der Regelschlaufe), doch die Langzeitstabilität wird mit $\pm 10^{-11}$ für die gesamte Lebensdauer des Strahl-Resonators von 5 bis 10 Jahren angegeben. Einige Probleme bietet die Abhängigkeit der Frequenz von äusseren Störfeldern. Diese verursachen eine Frequenzverschiebung von:

$$\Delta f [\text{Hz}] \approx 427 \text{ H [Gs]}$$

Noch bessere Resultate erwartet man vom analog konzipierten Thallium-Normal, da Th ein einfacheres Energiespektrum, eine höhere Transitfrequenz, einen niedrigeren Dampfdruck und geringere Empfindlichkeit gegenüber Störfeldern besitzt. Die Detektion des Th-Strahls ist allerdings etwas schwieriger.

4.2 Atomare Maser

Entsprechend der räumlichen Trennung von Atomen in verschiedenen Energiezuständen mittels Magneten, können die beiden Zustände des Inversionsspektrums von Ammoniak auf elektrostatischem Wege räumlich getrennt werden. Der N^{14}H_3 -Maser fokussiert auf diese Weise Moleküle des höheren Energieniveaus in eine Mikrowellen-Kavität hoher Güte Q , welche auf die Transitfrequenz $J = 3, K = 3$ von Ammoniak abgestimmt ist (23,87 GHz). Diese Moleküle werden hierdurch zur stimulierten Rückkehr auf das Inversions-Niveau angeregt, sodass bei genügendem Wirkungsgrad ein Teil der abgegebenen HF-Photon-Energie als Mikrowellenleistung ausgekoppelt werden kann. Die nötige Strahlintensität beträgt hierfür mindestens $5 \cdot 10^{12}$ Moleküle pro cm^2 und s. Als aktiver Generator wäre der NH_3 -Maser ein sehr interessanter Normalgenerator mit ausgezeichneter Kurzzeitstabilität, da keine Regelsysteme und Hilfsgeneratoren benötigt werden. Die technologischen Probleme sind jedoch dermassen gross, dass ihm fast nur noch historische Bedeutung zukommt.

Der vielversprechende Wasserstoff-Maser ist jedoch aus dem NH_3 -Maser hervorgegangen. Um die Dauer für die ato-

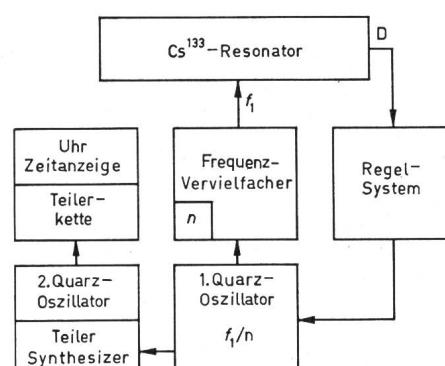


Fig. 17
Blockschema einer Cs^{133} -Atomuhr

D Atomdetektor, dessen Ausgangssignal über das Regelsystem den 1. Quarzoszillatoren steuert, der über den Frequenzvervielfacher die Transitfrequenz f_1 auf den Resonator gibt

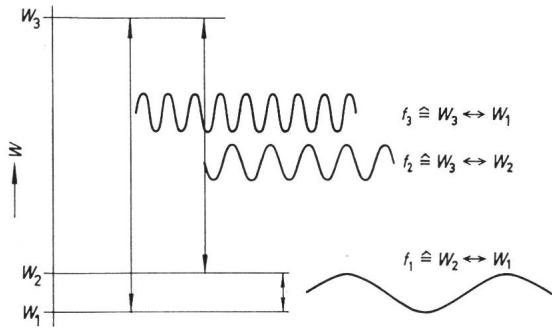


Fig. 18
Energiediagramm eines Atoms in vereinfachter Darstellung
Erklärungen siehe im Text

mare Wechselwirkung zu erhöhen, macht man von einer Speicherzelle Gebrauch. Das verwendete Wandmaterial hat auf die Atome eine sehr geringe desorientierende Wirkung, sodass ein H-Atom etwa 10^4 Reflexionen an der Zellenwand erleiden kann, bevor es entweder seinen Energiezustand ändert oder die Zelle wieder verlässt. Die Aufenthaltsdauer in der Kavität steigt dadurch auf ca. 1 s. Das Resultat ist eine ausserordentliche spektrale Reinheit des Ausgangssignals. Die Bandbreite bei $f_1 = 1,42$ GHz beträgt etwa 1 Hz, entsprechend einem Q von ca. 10^9 .

Der interessierende Übergang ($F = 1, m_F = 0 \leftrightarrow F = 0, m_F = 0$) in der hyperfeinen Struktur des Grundzustandes von Wasserstoff beruht jedoch auf einer Änderung des magnetischen Dipolmomentes, sodass die Selektion des Zustands (1,0) wieder auf magnetischem Wege erfolgen muss. Die erzielten Resultate kennzeichnen jedoch den H-Maser als den stabilsten der bisher gebauten Normalgeneratoren. Die «Kurzzeitstabilität» bei rund 30 min Beobachtungsdauer beträgt etwa 10^{-14} und die Frequenzunsicherheit 10^{-12} .

4.3 Puffergaszellen

Das Prinzip doppelter atomarer Resonanz mit optischer Anregung und -Detektion ist auf Alkalimetalle, wie Na^{23} , Rb^{87} , Cs^{133} anwendbar. Die Energieverhältnisse sind in Fig. 18 schematisch dargestellt. Die beiden Energien W_1 , W_2 sollen zwei nahe beieinander liegende Niveaus des Grundzustandes darstellen, während W_3 das Niveau des ersten angeregten Zustandes sei. Den hohen Energiedifferenzen $W_3 \leftrightarrow W_1$ und $W_3 \leftrightarrow W_2$ entsprechen Transitfrequenzen im optischen Bereich, während der Übergang $W_2 \leftrightarrow W_1$ einer Mikrowellenfrequenz entspreche. Im nichtangeregten Zustand sind die Atome gleichmäßig auf die beiden Grundzustände W_1 und W_2 verteilt. Wird nun Licht mit der Komponente f_3 und ausgetiltertem f_2 zugeführt, so gehen die Atome in den angeregten Zustand W_3 über, haben jedoch dort keine grosse Lebensdauer und sinken unter Abgabe eines entsprechenden Photons auf eines der Niveaus W_2 oder W_1 des Grundzustands zurück. Da nur f_3 als Pumpfrequenz zur Verfügung steht, läuft der Pumpvorgang nur für die Atome auf W_1 weiter, bis im Idealfall eine reine W_2 -Population entsteht. Ein angelegtes HF-Feld der Frequenz f_1 stimuliert diese Atome zur Rückkehr nach W_1 , wo der Pumpvorgang von neuem beginnt. In diesem Resonanzfall wird also ein grosser Anteil des einfallenden Lichtes zu Pumpzwecken absorbiert, wogegen mit $f \neq f_1$ keine Absorption stattfindet, da sich alle Atome auf W_2 befinden. Die steile Absorptionskurve des die Zelle durchdringenden Lichtes kann also zur Steuerung eines Quarzoszillators dienen, der über

Frequenzvervielfacher die Frequenz f_1 liefert und auf diese laufend korrigiert wird.

Die starke Desorientierung der Atome durch temperaturbedingte Kollisionen untereinander und mit der Zellenwand, die einem Pumpverlust entspricht, kann durch Zugabe von Puffergasen stark vermindert werden. Mit Cs^{133} und $\text{He} + \text{Ne}$ als Puffergas wurden Linienbreiten von 40 Hz erreicht ($f_1 = 9,2$ GHz).

Bekannt und kommerziell erhältlich sind aus dieser mit den Gas-Lasern verwandten Familie von Atomnormalen vor allem die Rb^{87} -Normale. Als Pumpquelle dient eine Rb^{87} -Entladungslampe mit nachgeschalteter Filterzelle für f_2 , die mit Rb^{85} und Argon gefüllt ist. Das Absorptionsgefäß enthält $\text{Rb}^{87} +$ eine Puffergas-Mischung, deren Zusammensetzung für den Temperaturgang von Bedeutung ist. Die typische Linienbreite beträgt 20 Hz bei 6,835 GHz.

Normale mit Puffergaszellen sind im Gegensatz zu den vorgängig beschriebenen Atomnormalen sekundärer Natur, da folgende Parameter die Frequenz f_1 beeinflussen:

Druck und Verhältnis der beteiligten Gase;
Zellen-Betriebstemperatur;
Leistung und Spektrum der Pumplichtquelle.

Die Vorteile dieser als kompakte Geräte herstellbaren Normale sind jedoch eine driftfreie Kurz- und Langzeitstabilität von 10^{-11} pro Sekunde und auch pro Monat.

Eine gute Übersicht der Vergleichsdaten von Atomnormalen liefert McCoubrey [15].

5. Ausblick

Wie schon erwähnt, werden die Atomnormale gegenüber den Quarznormalen stark an Bedeutung gewinnen, vor allem da, wo ein driftfreies Frequenzverhalten von ausschlaggebender Bedeutung ist. Wie jedoch aus diesem Überblick ersichtlich wird, sind gerade Atomnormale in grossem Masse von stabilen Hilfsgeneratoren abhängig, wenn es sich nicht um aktive Oszillatoren, wie die Maser handelt.

Ein weiterer Grund für das Fortbestehen des Quarzgenerators ist darin zu sehen, dass mit ihm ein fast unbeschränktes Frequenzgebiet beherrscht werden kann. Man kann hiezu den Einwand erheben, dass mit Frequenzsynthesizern von einem festgelegten Normal aus ebenfalls jede Frequenz mit der Stabilität des Normals erreichbar sei. Diese Stabilität kann sich jedoch nur auf das Langzeitverhalten beziehen, da gerade die spektrale Reinheit eines aktiven H-Masers durch Zuschalten weiterer Geräte höchstens verschlechtert wird. Auf hohe Langzeitstabilität wird man nur in Spezialfällen angewiesen sein, sodass die wirtschaftlicheren Sekundärnormale nicht an Bedeutung einbüßen, solange zu ihrer Kalibrierung Primärgeneratoren höchster Präzision zur Verfügung stehen.

Es ist hingegen durchaus denkbar, dass die Lasertechnik, deren enge Verwandtschaft mit den Puffergaszellen angedeutet wurde, im Verbund mit neueren Erkenntnissen auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik auch zu neuen Lösungen für Frequenznormale führt. Frequenznormale gewinnen ohnehin mit zunehmender Technisierung und Automation an Bedeutung. Abgesehen von Zeit- und Frequenzmessung und steigenden Präzisionsforderungen in der Informationsübertragung, bieten sich hochstabile Generatoren zur Lösung weiterer Aufgabenkreise an.

Als Beispiel seien die Decca- und Loran-Navigationssysteme erwähnt, die mit Hilfe von Langwellensendern stabiler Frequenz die Lösung eines zweidimensionalen Navigationsproblems erlauben. Mit der Atmosphäre als variablem passivem Übertragungsvierpol kann jedoch die Stabilität der heutigen Normale nicht voll ausgenutzt werden, der Grund übrigens, weshalb man «Zeit» mit transportablen Atomuhren von Ort zu Ort bringt, statt sie drahtlos zu übermitteln [16].

Die Stabilität eines Atomnormals würde eigentlich genügen, um auf Grund der Dopplerverschiebung das Tempo einer sportlichen Schnecke zu bestimmen. Eine Relativgeschwindigkeit von 3 mm/s gegenüber $c = 3 \cdot 10^{11}$ mm/s ergibt eine Frequenzverschiebung von 10^{-11} . Ganz allgemein kann aus der Funktion $\Delta f/f(t)$ eine beliebige Relativbewegung berechnet werden, und wenn zudem die beiden Zeitmaßstäbe durch Festlegung der Epoche 0 bei bekanntem Abstand synchronisiert wurden, wird auch der Abstand mit steigender Beobachtungsdauer immer präziser bestimmbar. Unter vereinfachenden Annahmen liesse sich dieses Prinzip auf n dimensionale Navigationsprobleme ausdehnen. Ort und Bewegung einer Anzahl Körper im Raum untereinander und auch in Bezug auf eine durch drei Punkte bestimmte Bezugsebene könnte durch mitgeführte, geeichte Zeitskalen berechnet werden. Von dieser Möglichkeit wird man vermutlich mit zunehmendem Luftverkehr Gebrauch machen müssen. Auch die Raumforschung ist aus demselben Grunde auf hochstabile Frequenzgeneratoren angewiesen.

Durch relativistische Einflüsse (Unschärferelation, Lorentz-sche Zeitkontraktion) werden diese vereinfacht dargestellten Verhältnisse natürlich kompliziert und auch limitiert. Mit «Flying Clock»-Experimenten, wie sie schon wiederholt mit Cs^{133} -Normalen durchgeführt wurden, sollte der relativistische Einfluss mit H-Masern schon nachweisbar sein.

Literatur

- [1] M. S. Buser: Das Normalmass «Sekunde». Bull. SEV 58(1967)12, S. 521...524.
- [2] W. Voigt: Lehrbuch der Kristallphysik mit Ausschluss der Kristalloptik, 2. Auflage, Leipzig, Teubner, 1928.
- [3] W. G. Cady: Piezoelectricity. An Introduction to the Theory and Application of electromechanical Phenomena in Crystals. Vol. I/II. Second edition, New York, Dover Publ., 1964.
- [4] W. P. Mason: Development in Ultrasonics. In: Proceedings of the Eighteenth Annual Frequency Control Symposium. Sponsored by the Solid State and Frequency Control Division, U.S. Army Electric Laboratories, Fort Monmouth/New Jersey, 1964, S. 12...42.
- [5] W. S. Mortley: Priority in Energy Trapping. Physics Today 19(1966)12, S. 11...12.
- [6] E. A. Gerber and R. A. Sykes: Quartz Frequency Standards. Proc. IEEE 55(1967)6, S. 783...791.
- [7] D. Aus dem Bruch: Der Einfluss des Schwingungsamplitude auf die Frequenzdrift von Quarzoszillatoren. Dissertation der Universität Freiburg im Breisgau 1962.
- [8] E. Hafner: The Effects of Noise in Oscillators, Proc. IEEE 54(1966)2, S. 179...198.
- [9] M. Schwartz: Information Transmission, Modulation and Noise, a Unified Approach to Communication Systems. New York, McGraw-Hill, 1959.
- [10] S. Schodowski: Aging of Temperature-Compensated Crystal Oscillators. Proc. IEEE 54(1966)5, S. 808...809.
- [11] R. E. Beehler: A Historical Review of Atomic Frequency Standards. Proc. IEEE 55(1967)6, S. 792...805.
- [12] W. Gerlach und O. Stern: Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld. Annalen der Physik 74(1924)16, S. 673...699.
- [13] W. Markowitz, R. G. Hall, L. Essen and J. V. L. Parry: Frequency of Cesium in Terms of Ephemeris Time. Physical Review Letters 1(1958)3, S. 105...107.
- [14] P. Kartaschoff, J. Bonanomi et J. De Prins: Etalons de fréquence au cézium, description et résultats. Helv. Phys. Acta 33(1960)7, S. 969...973.
- [15] A. O. McCoubrey: The Relative Merits of Atomic Frequency Standards. Proc. IEEE 55(1967)6, S. 805...814.
- [16] L. N. Bodily: Correlating Time from Europe to Asia with Flying Clocks. Hewlett-Packard Journal 16(1965)8, S. 2...8.
- [17] Frequency and Time Standards. Hewlett-Packard Application Note 52. Palo Alto/California, Hewlett-Packard Company, 1965.

Adresse des Autors:

M. S. Buser, Dipl. Ingenieur ETH, Institut für Fernmeldetechnik der ETH, Sternwartstrasse 7, 8006 Zürich.

Système électronique d'alarme centralisée

Conférence, donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE le 19 septembre 1967 à Zurich,
par Ph. Wiblé, Genève

65.011.56:621.39:621.31

Le problème de l'affichage des perturbations peut devenir compliqué, dans une installation importante, quand on doit surveiller un grand nombre de lignes de défauts. On examine le cas où l'installation se compose de m groupes identiques, comportant chacun n défauts. Le nombre total des défauts est $m \times n$, et il atteint vite plusieurs centaines. On décrit un système centralisé, dans lequel on n'affiche qu'une fois les défauts de même nature, en sélectionnant chaque groupe l'un après l'autre au moyen de boutons poussoirs lumineux. On aura donc n indicateurs lumineux et m boutons de groupe, soit $m+n$ organes, au lieu des $m \times n$ éléments conventionnels qu'il aurait fallu installer avec un système classique. Le système d'alarme centralisée en question utilise exclusivement des circuits logiques à transistors, montés sur circuits imprimés enfichables.

Das Problem der Störungsanzeige kann bei Anlagen, in welchen eine grosse Anzahl von Fehlerleitungen überwacht werden müssen, recht kompliziert werden. Es wird ein Fall untersucht, bei welchem eine Anlage aus m identischen Gruppen gebildet ist, von welchen jede n Fehler aufweisen kann. Die Summe der möglichen Fehler entspricht demzufolge dem Produkt $m \times n$; es kann bald auf einige Hundert Fehler ansteigen. Im Artikel wird ein System beschrieben, bei welchem die gleichartigen Fehler nur einmal angezeigt werden, während die Gruppen durch leuchtende Druckknöpfe nacheinander gewählt werden. Man wird also n Lichtzeiger und m Gruppenknöpfe benützen, bzw. $m+n$ Organe statt $m \times n$ konventionelle Elemente, welche in einem klassischen System erforderlich wären. Dieses zentralisierte Alarmsystem benützt ausschliesslich einsteckbare logische Schaltkreise mit Transistoren.

1. Idée générale

Dans une installation importante, où le nombre de lignes de défauts à surveiller peut être considérable, le problème de la surveillance et de l'affichage des perturbations devient compliqué et coûteux. C'est en particulier le cas quand l'installation comporte un certain nombre de «groupes» identiques (par exemple: départs de lignes, groupes de ma-

ches, etc.). Si l'on a m groupes, comportant chacun n possibilités de défauts, le nombre total des défauts possibles est $n \times m$, et il atteint facilement plusieurs centaines.

Les Services Industriels de Genève ont cherché une méthode nouvelle de signalisation centralisée qui permette de réaliser un affichage plus concentré et plus systématique des perturbations. L'idée de base du système consiste à