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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 37 (1959)

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

Artikel: Die Atomuhren

Autor: Bonanomi, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-875420

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: 11.01.2026

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

On conçoit qu'il s'agisse là d'un problème fondamental et passionnant, mais de longue haleine; son étude pourrait bien ne pas être sans importance pour le succès éventuel d'une théorie unitaire.

Bibliographie

[1] *Essen L.* et *J. V. Parry.* Phil. Trans. Roy., Soc., London. Series A **250** (1957), 45.

[2] *Bonanomi J.* et *J. Herrmann.* Helv. Phys. Acta **29** (1956), 228. *Bonanomi J., J. De Prins, J. Herrmann, P. Kartaschoff* et *J. Rossel.* Arch. Sc. Genève **10** (1957), 187 (Actes VIe Colloque A.M.P.E.R.E.) et Helv. Phys. Acta **30** (1957), 288.

[3] *Moeller C.* Nuovo Cimento. Suppl. Vol. VI (1957), 381.

[4] *Bonanomi J., J. De Prins, J. Herrmann* et *P. Kartaschoff,* et *J. P. Blaser, R. Cavedon, R. Payot* et *W. Schuler.* Helv. Phys. Acta **31** (1958), 278.

[5] *Blaser J. P.* et *J. De Prins.* Nature **182** (1958), 859.

[6] *Essen L., J. V. Parry, W. Markowitz* et *R. G. Hall.* Nature **181** (1958), 1054.

[7] *J. De Prins* et *P. Kartaschoff.* Bulletin technique PTT 1959, nº 1, p. 10...14.

Adresse de l'auteur: *Jean Rossel,* professeur, Institut de physique de l'Université, Neuchâtel.

J. BONANOMI, Neuchâtel

Die Atomuhren

Beschreibung der verschiedenen Typen

531.764.5

Unter Atomuhr verstehen wir eine Uhr – praktisch immer eine Quarzuhr – deren Gang mittels der Frequenz einer Spektrallinie gesteuert oder gegebenenfalls auch nur gemessen wird. Die Kernaufgabe beim Bau einer Atomuhr ist die genaue und reproduzierbare Messung der Frequenz einer Spektrallinie.

Die Spektrallinien im Mikrowellengebiet eignen sich ideal für die Steuerung einer Uhr. Erstens ist die Frequenz der Spektrallinie, das heisst die Resonanzfrequenz der betrachteten Atome oder Moleküle eine Naturkonstante, also unabhängig von Zeit und Ort; zweitens ist die Resonanzgüte ausserordentlich hoch ($Q = \nu/\triangle\nu$); sie ist theoretisch etwa 10^{15}, praktisch 10^7 bis 10^9.

Von der grossen Zahl der bekannten Spektrallinien im Mikrowellen-Spektral-Bereich sind bisher nur deren drei als Frequenznormale zur Anwendung gelangt, nämlich eine Linie des Inversionsspektrums von Ammoniak und je eine Linie des Hyperfeinstrukturspektrums von Cäsium und Rubidium.

Zwei für die Mikrowellenspektroskopie charakteristische physikalische Gesetze bestimmen weitgehend die Wahl der Spektrallinie und den Aufbau eines atomaren Frequenznormals. Sie seien nachstehend kurz beschrieben.

1. Eines der wesentlichen Merkmale der Mikrowellen-Spektroskopie ist, dass Moleküle oder Atome in diesem Bereich nur emittieren oder absorbieren können, solange sie einer Bestrahlung durch ein elektromagnetisches Feld geeigneter Frequenz ausgesetzt sind (induzierte Emission und Absorption). Im Gegensatz dazu emittieren Atome und Moleküle im optischen Bereich ihre Anregungsenergie spontan (spontane Emission), *nach* erfolgter Anregung irgendwelcher Art. Die Breite $\triangle\nu$ einer Mikrowellenspektrallinie wird demnach bestimmt durch die Zeit $\triangle t$, während der das Mikrowellenfeld auf das im übrigen ungestörte Molekül wirken kann, gemäss der einfachen Beziehung

$$\triangle t \cdot \triangle\nu \approx 1$$

Es leuchtet ein, dass eine möglichst schmale Linie erwünscht ist, denn die Ungenauigkeit der Bestimmung der Linienmitte, wie im allgemeinen auch die äussern Einflüsse auf die Frequenz der Linienmitte, sind der Linienbreite direkt proportional.

2. Ein weiteres wichtiges Merkmal der Mikrowellenspektroskopie gegenüber der klassischen Spektroskopie betrifft die Verteilung der Moleküle im thermodynamischen Gleichgewichtszustand auf die verschiedenen möglichen Energieniveaus. Im einfachsten Falle eines Moleküls (oder Atoms) mit nur zwei Energieniveaus, verhält sich die Anzahl der Moleküle N_2 im obern Zustande zur Anzahl N_1 im untern Zustand, wie:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

mit $h = 6{,}7 \cdot 10^{-27}$ erg sec

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ erg grad^{-1}

ν = Frequenz des Ueberganges (10^{10} für Mikrowellen 10^{15} für Licht)

T = Absolute Temperatur

Das Einsetzen der Werte ergibt

$N_2 = O$ für optische Energiezustände und

$N_2 = N_1$ für Mikrowellenübergänge.

Bei Zimmertemperatur sind also beide Energieniveaus eines Mikrowellenüberganges etwa gleich bevölkert, so dass ein mit Mikrowellen geeigneter Frequenz bestrahltes Gas fast gleich viel absorbiert wie emittiert, und somit die beobachtete Spektrallinie äusserst schwach ist. Als atomares Frequenznormal eignet sich jedoch nur eine starke Spektrallinie, da sonst die Bestimmung ihres Zentrums wegen des immer vorhandenen thermischen Rauschens ungenau wird.

Die besprochenen zwei Gegebenheiten der Mikrowellenspektroskopie:

a) Breite der Spektrallinien umgekehrt proportional der Wechselwirkungszeit mit dem Mikrowellenfeld;

b) Gleichheit der Besetzungszahlen der Energiezustände;

bestimmen weitgehend die Eigenschaften einer Atomuhr. Die verschiedenen Typen von Atomuhren unterscheiden sich im wesentlichen in der Art und Weise, wie eine schmale und zugleich intensive Spektrallinie erzeugt wird.

Im Folgenden seien die verschiedenen Typen von Atomuhren kurz beschrieben:

a) Die Ammoniakuhr

In einem hochevakuierten Gefäss wird ein Strahl von Ammoniakmolekülen erzeugt. Der Strahl passiert zuerst ein elektrisches Feld mit einem starken radialen Gradienten. Die Moleküle erfahren durch Starkeffekt eine radiale Kraft; für Moleküle des untern Zustandes ist diese Kraft radial nach aussen gerichtet, und diese Moleküle scheiden aus dem Strahl aus; umgekehrt werden die Moleküle des oberen Zustandes gegen die Strahlmitte abgelenkt und verbleiben im Strahl.

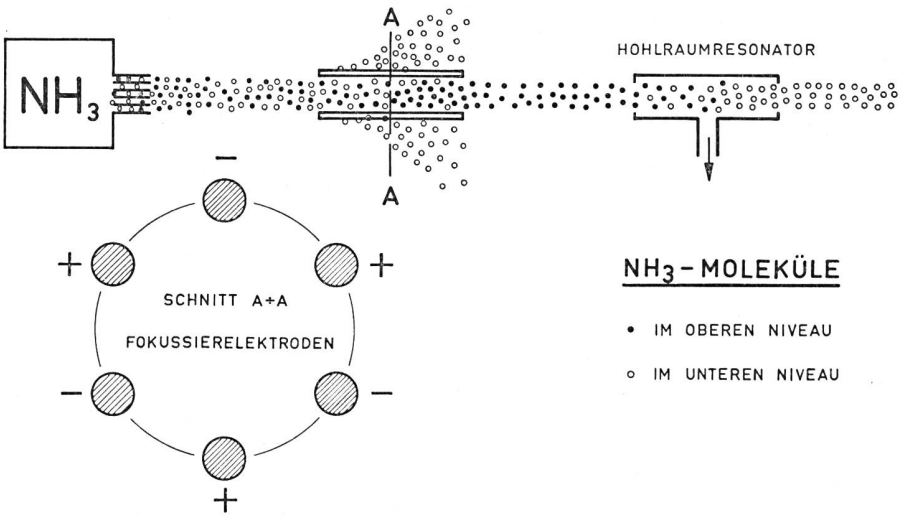

Fig. 1.
Prinzipschema eines Ammoniakoszillators

In ein luftleeres Gefäss werden Ammoniakmoleküle (NH_3) eingelassen. Bei A herrscht ein starkes elektrisches Feld, das nur Moleküle des oberen Niveaus durchlässt. Diese gelangen schliesslich in einen Hohlraumresonator, wo sie ihre charakteristische Strahlung sehr konstanter Frequenz ausstrahlen

Beim Austritt aus dem elektrischen Feld besitzt der Strahl einen grossen Überschuss an Molekülen des obern Energieniveaus und wird unter Einfluss eines Mikrowellenfeldes die charakteristische Ammoniakfrequenz emittieren. Dies geschieht in einem auf Ammoniakfrequenz abgestimmten Hohlraum. Man macht den Hohlraum möglichst lang (zum Beispiel 60 cm), dann durchfliegt ihn ein Molekül in 10^{-3} s und dies ergibt ein Q von ca. $2 \cdot 10^7$ (siehe Figur 1).

Wenn nun die Frequenz des den Hohlraum anregenden Signals durch die Ammoniakresonanz hindurchgeht, wird das Signal durch die Emmission der Moleküle verstärkt, und die der maximalen Verstärkung entsprechende Frequenz kann gemessen werden.

Falls laufend genügend Moleküle zugeführt werden, wird die Verstärkung unendlich und der Strahl emittiert ohne äusseres anregendes Signal. Die Frequenz der emittierten Welle ist ziemlich genau die der Spektrallinienmitte. Figur 2 zeigt die Ansicht der Ammoniakuhr.

b) Die Cäsiumuhr

Wie im Falle des Ammoniaks, verwendet man einen Atomstrahl im Hochvakuum, der zur Erzielung eines hohen Q-Wertes in einem möglichst langen, resonanten Hohlraum mit einem Mikrowellenfeld in Wechselwirkung tritt (s. Figur 3). Die Anreicherung eines Energieniveaus geschieht ebenfalls durch Ablenkung des Strahles, hier jedoch in einem *Magnetfeld (Zeeman-Effekt)* mit transversalem Gradienten.

Beim Austreten aus dem Hohlraum passieren die Atome einen zweiten Magneten, der sie, falls sie im Hohlraum emittiert haben, sich also im untern Energieniveau befinden, auf den Detektor lenkt. Der Detektor besteht aus einem glühenden Wolframdraht, den die auffallenden Atome, als positive Ionen, sofort wieder verlassen. Der mittels Elektronenvervielfacher gemessene Ionenstrom steigt stark an, falls das den Hohlraum anregende Signal die Atomresonanz durchläuft, und es wird die dem maximalen Detektorstrom entsprechende Frequenz gemessen. Figur 4 zeigt die Montage von Cäsium-Atomuhren.

c) Die Gaszellen

Die Gaszellen bestehen aus einem Glaskolben, beispielsweise mit Rubidiumdampf (etwa 10^{-6} mm Hg Partialdruck) und einem Edelgas (Druck etwa 10 cm Hg) gefüllt. Ohne Edelgas wäre die Wechselwirkungszeit der Rubidiumatome mit einem eingestrahlten Mikrowellenfeld recht kurz, nämlich die Zeit zwischen zwei Wandstössen; die beobachtete Spektrallinie wäre deshalb breit, und wegen des Dopplereffektes noch zusätzlich verbreitert. Das Edelgas hat zur Folge, dass die Rubidiumatome nur sehr langsam im Gefäss herumdiffundieren können, so dass die Wechselwirkungszeit Δt mit dem eingestrahlten Feld lang wird (die Zusammenstösse der Rubidiumatome mit den Edelgasatomen unterbrechen den Emissionsprozess nicht). Das Edelgas bewirkt also eine schmale Linie, es wurden Q-Werte

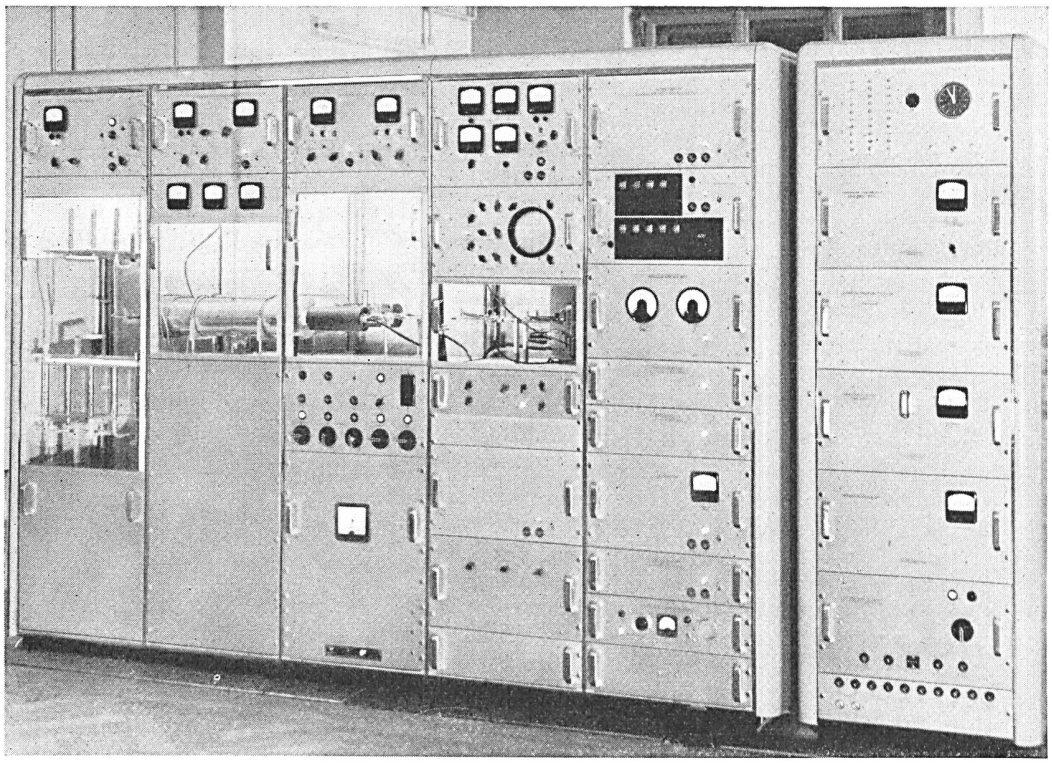

Fig. 2.
Ammoniakuhr

Eine Entwicklung des Laboratoire suisse des recherches horlogères in Neuenburg. Ihre Gangabweichungen betragen höchstens 10^{-10}, das heisst 1/100 000 Sekunde je Tag

von 10^9 gemessen. Um die Intensität der Linie, die sonst undetektierbar wäre, anzuheben, geht man folgendermassen vor:

Mit Hilfe einer ganz speziellen Lichtquelle wird Licht eingestrahlt, dessen Wellenlänge nur von den Rubidiumatomen im unteren Mikrowellen-Energieniveau absorbiert werden kann. Dieser optischen Absorption folgt unmittelbar eine Emission, welche die ursprünglich aus dem untern Niveau stammenden Atome gleichmässig auf beide Niveaus verteilt. Der Endeffekt ist eine totale Entvölkerung des untern Niveaus. Dieses Vorgehen zur Entvölkerung eines Niveaus trägt den Namen «Optisches Pumpen».

Ausser dem Licht wird noch ein Mikrowellensignal eingestrahlt. Falls dieses Signal nun die Mikrowellenresonanz durchläuft, werden die Rubidiumatome Mikrowellen emittieren und dadurch in das untere Niveau fallen, von dem aus sie wieder Licht absorbieren können, das sie in Form von Streulicht sofort wieder ausstrahlen. Die Intensität des Streulichts wird als Funktion der eingestrahlten Mikrowellenfrequenz mit einem Photomultipler gemessen. Die Frequenz des Maximums ist die Frequenz der Linienmitte.

Es ist im Rahmen dieser Ausführungen nicht möglich, auf alle Neuentwicklungen und erfolgversprechenden Vorschläge für neue Typen von Atomuhren einzugehen. Das Gebiet befindet sich noch im Stadium rascher Entwicklung, obwohl schon heute die Atomuhren um zwei Grössenordnungen genauer sind als die bisher genaueste Uhr, die Erdumdrehung.

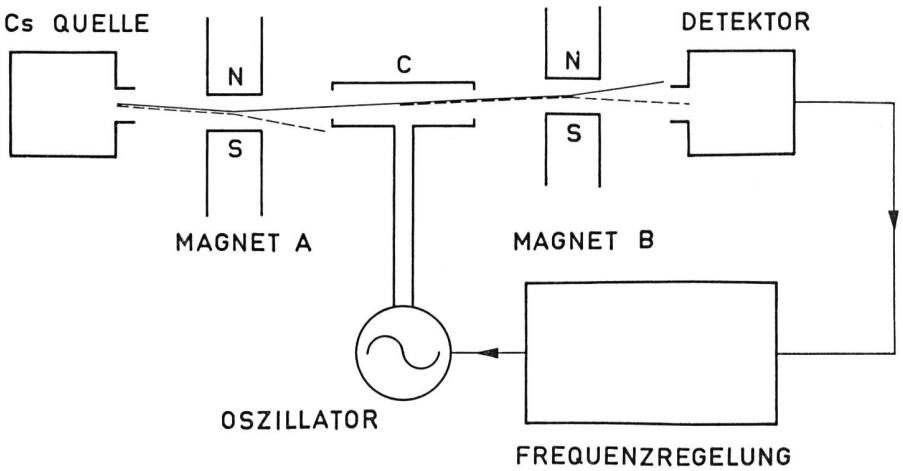

Fig. 3.
Prinzipschema eines Caesium-Atomstrahlrohres

In einer hochevakuierten Apparatur gelangen nur dann Atome von der Quelle zum Detektor, wenn der Oszillator genau auf der Frequenz der Atome schwingt; denn nur dann werden die Atome beim Durchfliegen des Hohlraumresonators C zur Resonanz angeregt. Eine automatische, vom Detektor gesteuerte Frequenzregelung stimmt den Oszillator fortwährend nach

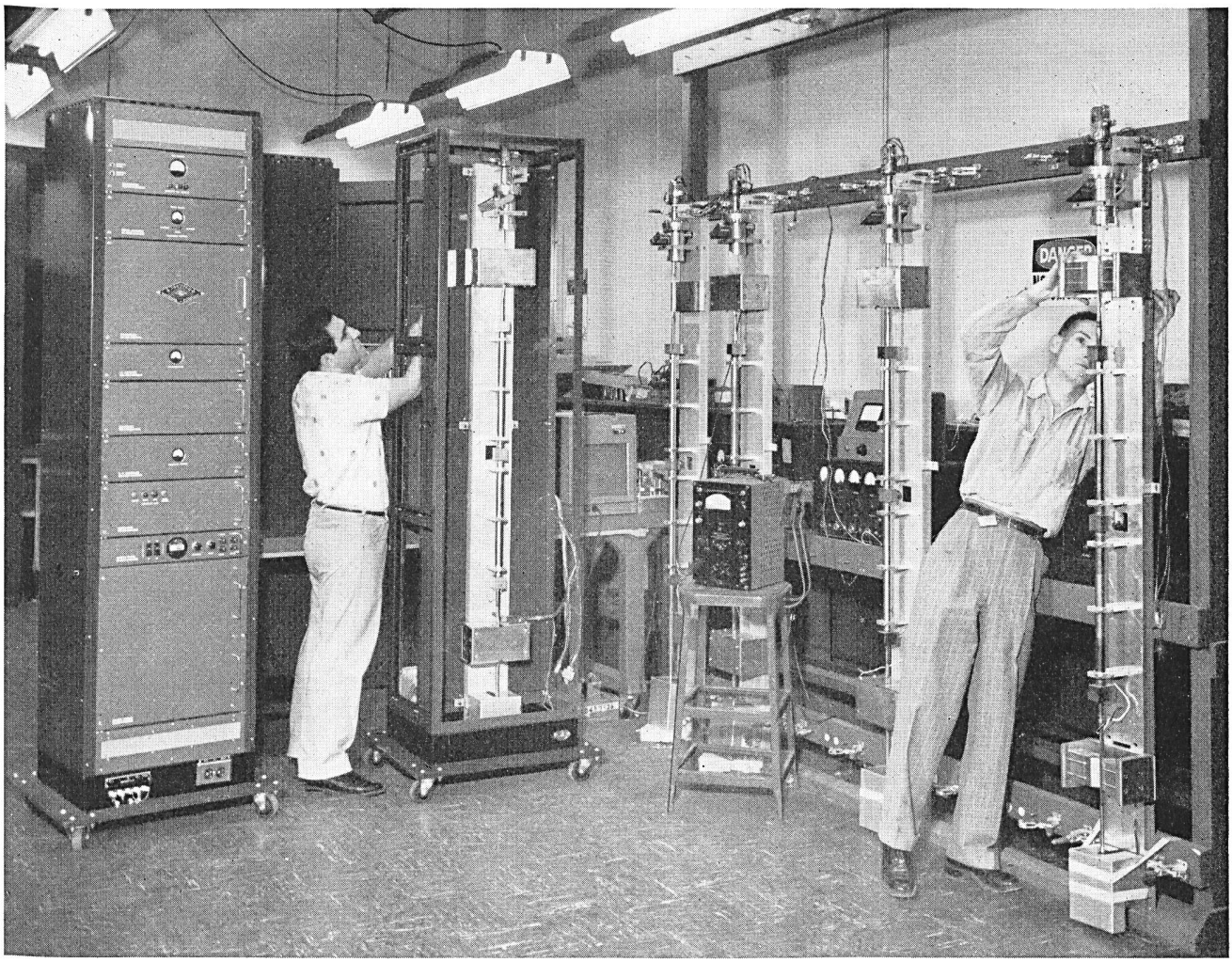

Fig. 4. Montage von Caesium-Atomuhren — Werkphoto der National Co., Malden (Massachusetts)

Die erreichte Genauigkeit ist die gleiche, wie die der abgebildeten Ammoniakuhr

Es ist in diesem Rahmen auch nicht möglich, die Vor- und Nachteile der verschiedenen Uhren-Typen im einzelnen zu besprechen. *Ammoniakstrahloszillatoren* wurden erstmals 1954 von *Townes* und *Gordon* in den USA gebaut. Wir haben diese Oszillatoren in Neuenburg zu hochstabilen Frequenznormalen weiterentwickelt: Reproduzierbarkeit 10^{-10} über beliebig lange Zeiten.

Die gleiche, vielleicht noch etwas höhere Präzision von 10^{-10} wurde mit Hilfe von Cäsiumstrahlrohren am National Physical Laboratory in London und von der National Company in Boston, erreicht. Viele andere Laboratorien haben seither Atomuhren entwickelt, und es ist zu erwarten, dass die Genauigkeit von 10^{-10} bald auch von andern erreicht und überschritten werden wird.

Adresse des Verfassers: Dr. *J. Bonanomi*, dipl. phys. ETH, Laboratoire suisse de recherches horlogères, Neuchâtel.