

Atomare Definition der Zeiteinheit 1967–2017

Andreas Bauch*

1. Einleitung

«*Vous avez déjà dû donner au Monde une nouvelle définition du mètre, basée sur la longueur d'onde d'une radiation lumineuse. Voici que vous allez, au cours de cette session, rechercher dans la profondeur de l'atome l'étalon de définition du temps, celui de la seconde. Vous nous offrez un beau sujet de méditation; la mesure de la course des étoiles dans un cosmos infiniment grand, à l'aide de la vibration d'un atome infiniment petit !*»

„Sie haben bereits der Welt eine neue Definition des Meters zur Verfügung gestellt, die auf der Wellenlänge einer Lichtstrahlung beruht. So werden Sie im Verlauf dieser Sitzung in der Tiefe des Atoms das Normal für die Definition der Zeit – die Sekunde – erforschen. Sie bieten uns ein schönes Thema zum Reflektieren: die Messung der Sternbahnen in einem unermesslich weiten Kosmos mithilfe der Schwingung eines unendlich kleinen Atoms!“

Mit diesen Worten eröffnete der französische Außenminister Maurice Couve de Murville die 13. Sitzung der Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM, von *Conférence générale de poids et mesures*) im Oktober 1967. In der Tat erfolgte der Beschluss, die Sekunde neu zu definieren, und zwar wie folgt (siehe am Ende von Anhang 1):

«*La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.*»

„Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung“.

In diesem Heft der PTB-Mitteilungen soll in verschiedenen Beiträgen aufgezeigt werden, wie es zu diesem Beschluss, zu dem Zahlenwert und zu

dem Wortlaut kam. Offensichtlich musste zuerst „die Atomuhr“ erfunden werden. Einige Grundlagen und Voraussetzungen werden im nächsten Kapitel behandelt, und der Leser wird bemerken, dass Physiker aus England und USA diese Entwicklung wesentlich befördert haben. Dies behandeln die zwei Beiträge von Mitarbeitern aus den damals aktiven Metrologieinstituten, von Peter Whibberley vom *National Physical Laboratory* (NPL), Teddington, UK, und von Michael Lombardi vom *National Institute of Standards and Technology* (NIST), Gaithersburg bei Washington DC, und Boulder, Colorado, US, damals noch *National Bureau of Standards* (NBS) genannt. Der Leser mag in diesen beiden Artikeln gewisse Überschneidungen – auch mit Inhalten des vorliegenden Artikels – finden. Dies erleichtert aber das Verständnis jedes der eigenständigen Beiträge und wurde bewusst in Kauf genommen. Als Autor im Jahr 2017 benutzt man dankbar die zahlreichen Publikationen, die in den letzten sechzig Jahren entstanden und die viel detaillierter die Entwicklung nachzeichnen, als es hier möglich ist [1–8].

Die Entscheidung über die Neu-Definition einer Einheit ist wissenschaftlich wie wissenschaftspolitisch ein bedeutender Akt. Die Akteure werden in Kapitel 4 vorgestellt und, soweit zugänglich und aus Platzgründen möglich, die Entscheidungsfindung von den Anfängen bis in das Jahr 1967 nachgezeichnet. Es kommen auch die Alternativen zur Caesiumdefinition zu ihrem Recht, und Beiträge aus anderen Ländern werden vorgestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Rolle der PTB eher bescheiden und wird in Kapitel 5 skizziert. Soweit aus den Dokumenten zu erschließen ist, trug ein Beitrag aus der PTB zumindest zur Klärung bei, dass mit der neuen Sekunden-Definition die Einheit der *Eigenzeit* (*proper time unit*) definiert werden sollte und daher eine explizite Erwähnung der Relativitätstheorie nicht notwendig ist bzw. sogar irreführend wäre. Der Beitrag von Claus Kiefer in diesem Heft wird dabei helfen, diese Thematik zu verstehen. Seit dem Jahr 1967 wurde die Unsicherheit, mit der

* Dr. Andreas Bauch, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

Caesium-Atomuhren die SI-Sekunde realisieren, um nahezu eine Größenordnung pro Dekade reduziert. In Kapitel 6 skizziere ich knapp die stattgefundene Entwicklung. Die Atomuhrentwicklung und -verbreitung hat zahlreiche Konsequenzen für technische und wissenschaftliche Anwendungen. Der Beitrag von Gerhard Beutler soll hier stellvertretend über die Nutzung der Atomuhr im Bereich der Geodäsie berichten. Weil es immer gut ist zu wissen, woher man kommt, habe ich Johannes Graf gebeten, den historischen Kontext noch weiter zurückblickend zu beschreiben. Weil es weiterhin keinen Stillstand in der Uhrentwicklung gibt, sondern im Gegenteil in kurzer zeitlicher Folge immer neue faszinierende Ergebnisse publiziert werden, wird im Beitrag von Ekkehard Peik die Zukunft der Zeiteinheit beleuchtet.

Weiterführendes Material ist in zwei Anhängen zusammengefasst, um den Lesefluss im vorliegenden Artikel nicht zu unterbrechen. Im ersten sind einige Zitate aus Protokollen (*procès verbaux, rapports*) der Sitzungen der diversen Komitees in der Originalsprache enthalten.

Im zweiten wird eine Kurzbeschreibung der Funktion der Caesium-Atomuhr gegeben.

2. Die Entwicklung der ersten Atomuhren

Die Wechselwirkung zwischen dem positiv geladenen Kern und der Hülle aus negativ geladenen Elektronen der Atome führt zur Ausbildung von stabilen Konfigurationen der Elektronenhülle eines Atoms. Die Quantenmechanik sagt u. a. voraus, wie die Bindungsenergie einer solchen Konfiguration, auch Eigenzustand des Atoms genannt, von Fundamentalkonstanten, wie dem Elektron-zu-Proton-Massenverhältnis, der Elementarladung, der Lichtgeschwindigkeit und der sogenannten Feinstrukturkonstanten α abhängt. Im Kontext dieses Aufsatzes erscheint die Aussage gerechtfertigt, dass die Bezeichnung „Konstanten“ korrekt ist, der Energieabstand zwischen Eigenzuständen daher ebenfalls konstant ist. Schon 1870 hatte der englische Physiker James Clerk Maxwell vorgeschlagen, grundsätzlich derartige Naturkonstanten für die Festlegung der physikalischen Einheiten zu verwenden und sich nicht auf von der Erde gelieferte Maße, wie die Tageslänge für die Sekunde oder den Erdumfang für das Meter, zu beziehen.

Ein Übergang zwischen zwei atomaren Eigenzuständen mit einer Energiedifferenz ΔE ist mit der Absorption oder Emission elektromagnetischer Strahlung der Frequenz $f = \Delta E/h$ verknüpft. Die Frequenz f bzw. die Periodendauer $1/f$ einer solchen Strahlung ist nach dem Voranstehenden prinzipiell konstant, anders als die Periode der Erdrotation, erst recht aber als die Schwingungsdauer eines Pendels, sei es noch so aufwendig

konstruiert und aufgehängt. Ein bestimmtes Vielfaches von $1/f$ als neue Zeiteinheit zu definieren entsprach der Idee Maxwells und wurde erstmals 1940 von dem amerikanischen Physiker Isidor Isaac Rabi konkret vorgeschlagen: Seine Methode der *molecular beam magnetic resonance* könne man nicht nur zur Untersuchung atomarer Eigenschaften verwenden, schrieb er, sondern, quasi in Umkehrung, die Übergangsfrequenz zwischen zwei ausgewählten atomaren Zuständen sei als Referenz für ein Frequenznormal nutzbar. Er identifizierte die Hyperfeinstrukturzustände im Atom ^{133}Cs als hierfür besonders geeignet [9]. Mit dem Nobelpreis 1944 ausgezeichnet, schaffte es sein Vorschlag als „*radio frequencies in hearts of atoms would be used in most accurate of time-pieces*“ an prominenter Stelle in die Ausgabe der *New York Times* vom 21. Januar 1945.

Rabis Vorschlag hatte einerseits eine Vorgeschichte und andererseits dauerte es weitere 10 Jahre, ehe die erste Caesium-Atomuhr „tickte“, hierzu noch einige Bemerkungen [8]. Für die Entstehung der Caesium-Atomuhr unerlässlich waren drei Errungenschaften: die Erzeugung von Atomstrahlen im Vakuum, das Verständnis der Richtungsquantisierung, d. h. der Ausrichtung magnetischer Momente von Atomen im Raum und ihrer Manipulationsmöglichkeiten, und die Entwicklung elektronischer Komponenten zur Erzeugung der notwendigen Anregungsstrahlung und deren Kontrolle. Die ersten beiden Errungenschaften sind untrennbar verbunden mit dem Namen Otto Stern, Professor an den Universitäten von Frankfurt und Hamburg (ab 1923) [10]. In seinen ersten Experimenten konnte er die Geschwindigkeitsverteilung von Atomen in einem Atomstrahl ermitteln. Das zusammen mit Walter Gerlach durchgeführte „Stern-Gerlach-Experiment“ begegnet praktisch jedem Physiker in der „Einführung in die Atomphysik“ – in Vorlesung oder Lehrbuch. Es erbrachte den Nachweis, dass das magnetische Moment eines Atoms in einem äußeren Magnetfeld nicht beliebige Orientierungen, sondern diskrete Werte einnimmt. Die Kraft auf ein Atom mit magnetischem Moment μ in einem inhomogenen Magnetfeld nimmt dann ebenfalls diskrete Werte an. Im historischen Experiment wurde die Aufspaltung eines Silber-Atomstrahls nach der Passage eines inhomogenen Magnetfelds beobachtet. Zwei Hamburger Mitarbeiter Sterns, Otto Frisch und Emilio Segrè, blockierten in ihrem Experiment einen der Teilstrahlen hinter dem Magneten „A“ (Polarisator), selektierten den anderen mit einem zweiten Magneten „B“ (Analysator) und induzierten Übergänge zwischen den Zuständen der Richtungsquantisierung in der Zwischenregion „C“ mittels eines statischen Magnetfelds mit schneller Richtungsänderung. Rabi, auch zeitweise Mitarbeiter von Stern und inzwischen an der

Columbia University, bewirkte 1938 im statischen C-Feld durch Radiofrequenz-Einstrahlung bei der Frequenz $f_0 = (E_2 - E_1)/h$ den Übergang zwischen Zuständen der Richtungsquantisierung mit den Energien E_1 und E_2 . Bis heute wird der Begriff „C-Feld“ für den Bereich des schwachen statischen Feldes verwendet, in dem der Hyperfeinstrukturübergang in Caesiumatomen durch die Wechselwirkung mit Mikrowellenstrahlung induziert wird, selbst wenn es in einer Caesium-Fontänenuhr (siehe Kapitel 6) keine Magnete „A“ und „B“ mehr gibt. Die Funktion der Caesium-Atomuhr wird in Anhang 2 beschrieben. Dort wird auch auf eine andere wesentliche Entwicklung aus diesen Jahren, Norman Ramseys Methode der *separated oscillatory fields* [11,12], eingegangen, mit der die Vorteile der Resonanzspektroskopie im Atomstrahl erst voll zur Geltung kommen.

Einen atomaren Übergang anzuregen und nachzuweisen ist sozusagen der erste Schritt. Hierfür ist – für die in der damaligen Zeit diskutierten Atome – durchstimmbare Strahlung im Mikrowellenbereich (Frequenzen 1 GHz bis 30 GHz) notwendig. Diese muss durch Frequenz-Vervielfachung von Radiofrequenz-Signalen im Kilohertzbereich aus einem Quarzoszillator erzeugt werden. Aus der Beobachtung der Wirkung auf die Atome gewinnt man ein Regelsignal zur Steuerung des Quarzoszillators, und durch Frequenzteilung von dessen Signal wiederum Impulse mit der Wiederholrate Eins pro Sekunde. Diese kann man dann zählen und zum Antrieb eines Uhrwerks verwenden. Die Entwicklung der vielfältigen, komplizierten elektronischen Komponenten gelang erst in der Dekade nach dem 2. Weltkrieg, in dessen Verlauf die Radartechnik erhebliche Fortschritte gemacht hatte [4]. Im gleichen Zeitraum wurden auch verschiedene Atome und Moleküle als Kandidaten für eine Atomuhr diskutiert, nämlich Wasserstoff, Rubidium, Caesium, Thallium und daneben das Ammoniakmolekül. Letzteres ist insofern historisch interessant, weil es in der ersten funktionierenden „Atomuhr“ verwendet wurde, wenn auch nicht mit dem gewünschten und erwarteten Gewinn an Genauigkeit, wie Lombardi beschreibt.

Die Entwicklung der ersten Caesium-Atomuhr erfolgte gleichzeitig am amerikanischen NBS (heute NIST) und am britischen NPL. Neben den Beiträgen aus diesen Instituten in diesem Heft sind die persönlichen Erinnerungen von Louis Essen [6] lesenswert. Das NPL hatte die Nase vorn, die erste funktionstüchtige Atomuhr wurde 1955 vorgestellt [13]. Die Autoren schätzten ab, dass die realisierte Übergangsfrequenz um weniger als relativ $2 \cdot 10^{-10}$ von dem Wert abweichen sollte, den man mit ideal ungestörten Atomen erreichen könnte. Eine solche „Unsicherheit“ des primären Normals ist die entscheidende Kenngröße im Ranking verschiedener Normale. Die Terminolo-

gie hat sich allerdings erst in den Jahren und Jahrzehnten danach voll entwickelt. Bereits im darauffolgenden Jahr konnte man die ersten Caesium-Atomuhren kaufen: Bis zum Jahr 1960 produzierte die *National Company* ca. 50 Exemplare ihres „Atomichrons“ [4,5]. Bei Lombardi finden wir die Ansicht des kompletten Geräts, in der PTB ist mit Glück ein „Strahlrohr“ vor der Verschrottung gerettet worden und hängt im Gang des „Zeitlabors“, dem Kopfermann-Bau, siehe Bild 1. In den frühen 1960er-Jahren begann die Firma Hewlett-Packard (HP), Caesium-Atomuhren auf den Markt zu bringen. Die ersten Strahlrohre waren noch etwas unhandlich, etwa 60 cm lang, und wurden von einem Unternehmen aus der Firmengruppe *Varian Associates* in Beverly, Massachusetts, produziert. Aber bereits 1964 kam zunächst das Modell 5060 und wenige Jahre später das Modell 5061 auf den Markt. Beide passten in übliche Elektronikschränke und wurden in beträchtlichen Stückzahlen verkauft. Die PTB beschaffte im Jahr 1967 eine Uhr vom Typ 5060, die jedoch nicht erhalten ist. In der ältesten hier erhaltenen Uhr vom Typ 5061A aus dem Jahr 1969 wurden nacheinander bis 1996 drei Caesiumstrahlrohre benutzt. Das zuletzt benutzte wurde danach aufgeschnitten und die Uhr dient in der PTB als Anschauungsob-



Bild 1:
Das Strahlrohr des Atomichrons der PTB, welches Mitte der sechziger Jahre benutzt wurde, um die Gänge der Quarzuhren in Braunschweig und in Mainflingen zu kontrollieren. Einige Elemente sind farbig markiert, so die magnetische Abschirmung (gelb), der Detektor (blau) und die Ablenk-magnete (grün). Die Abschirmung ist aufgeschnitten und so sieht man die beiden Endstücke des Ramsey-Resonators (hellgrün). Der Atomstrahl verläuft teilweise in einem dünnen Metallrohr (rosa).

Bild 2:
Kommerzielle Atom-
uhr vom Typ 5061A
aus dem Jahr 1996.
Oben sieht man das
aufgeschnittene
Strahlrohr mit dem
Caesiumofen links
und dem Detektor
rechts. Die beiden
Ablenkmagnete
sind durch die Hal-
terung verdeckt, der
Ramsey-Resonator
aus Kupfer ist gut
zu erkennen.



jekt (Bild 2).

Aus den frühen 1960er-Jahren datieren Arbeiten über Atomuhren, die andere Elemente als das Caesium verwendeten. Im *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) entstand Ende der 1950er-Jahre der sogenannte Wasserstoffmaser, in dem die Hyperfeinstrukturfrequenz des Wasserstoffatoms bei 1,4 GHz benutzt wird [14]. Bereits im Jahr 1964 wurde ein kommerzieller Wasserstoffmaser, von *Varian Associates* produziert, in Lausanne auf dem *Congrès de Chronometrie* vorgestellt und die Wasserstoff-Hyperfeinstrukturfrequenz mit Bezug auf eine Hewlett-Packard-Caesium-Atomuhr bestimmt [5]. Vom Wert der Caesium-Hyperfeinstrukturfrequenz wird gleich noch zu reden sein.

Der früheste Beleg der Nutzung der Hyperfeinstrukturfrequenz des Thallium bei 21,3 GHz datiert aus dem Jahr 1962 [15]. In diesen Jahren war das *Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères* (LSRH) sehr aktiv und entwickelte parallel dazu auch eine Caesium-Atomuhr à la NPL und NBS. Die höhere Frequenz des Thalliumübergangs sollte à priori ein Vorteil bezüglich erreichbarer Stabilität und Genauigkeit der Uhr sein, erwies sich aber anfangs als große technische Herausforderung. Der langfristig wohl schwerwiegendere Nachteil des Atoms Thallium sind die geringen Kräfte, die mit inhomogenen Magnetfeldern aufgebracht werden können, sodass die erreichbaren Ablenkwinkel klein sind und

zur Trennung der beiden Atomzustände eine lange Apparatur notwendig ist (siehe Anhang A2). Zur Erzeugung eines intensiven Atomstrahls war außerdem eine Temperatur von ca. 700 °C notwendig. An eine Miniaturisierung war nicht zu denken, und nach 1967 findet man praktisch keine Erwähnung dieses Atomuhr-Typs mehr.

In den Diskussionen zur Neudefinition wurde das Für und Wider dieser drei möglichen Kandidaten abgewogen, das Rubidium war schon 1965 „aus dem Rennen“. Das Prinzip der Realisierung der Rubidium-Atomuhr, in [16, 17] beschrieben, führt zu großen systematischen Verschiebungen der Resonanzfrequenz, die schwer zu modellieren sind. Schon früh wurde allerdings die Möglichkeit der Miniaturisierung erkannt und umgesetzt, und heute basiert die mit Abstand größte Zahl produzierter Atomuhren auf Rubidium. Die Signale der Satelliten des *US Global Positioning System* GPS werden heute überwiegend von Rubidium-Atomuhren an Bord abgeleitet, siehe hierzu den Artikel von Gerhard Beutler in diesem Band.

3. Die Bestimmung des Zahlenwerts 9 192 631 770

Die Sekunde als Einheit der Zeit war ursprünglich de facto definiert als Bruchteil des mittleren Sonnentages. Die Internationale Astronomische Union

empfahl 1955 stattdessen die Sekunde der Ephemeriden-Zeit als Zeiteinheit zu verwenden. Denn der jährliche Umlauf der Erde um die Sonne ist in der Tat gleichförmiger und besser vorhersagbar als die Drehung der Erde um ihre Achse. Ausgangspunkt ist das sogenannte tropische Jahr, die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Frühlings-Tag-und-Nacht-Gleichen. Da diese Zeitspanne wegen Präzession und Nutation der Erdachse in bekannter, gesetzmäßiger Weise veränderlich ist, wurde die Sekunde als Bruchteil $1/31\,556\,925,9747$ des differentiellen tropischen Jahrs mit dem 31. Dezember 1899, zwölf Uhr Weltzeit, als Mittelpunkt vorgeschlagen [1]. Die festgelegte Zahl stützt sich auf eine Berechnung von Simon Newcomb aus dem Jahr 1895, der astronomische Beobachtungen aus den Jahren 1750–1892 ausgewertet und das mittlere Verhältnis der Perioden von Erdrotation und Erdumlauf ermittelt hatte. Im Prinzip erfordert die Angabe eines Zeitpunkts in Ephemeriden-Zeit die Bestimmung der Position der Sonne vor dem Fixsternhimmel. Das geht in vernünftiger Zeit nur sehr ungenau. Stattdessen behilft man sich mit der Bestimmung der Mondposition vor den Fixsternen, und hierfür entwickelte William Markowitz vom *United States Naval Observatory* (USNO) die sogenannte *dual-rate moon camera*. Wie genau man damit letztlich die Dauer der Ephemeriden-Zeit bestimmen konnte ist wohl auch unter Astronomen umstritten [1, 18].

Von 1955 bis 1958 wurde in Zusammenarbeit zwischen NPL und USNO die Dauer der Ephemeriden-Sekunde zu $9\,192\,631\,770$ Perioden der Cs-Übergangsfrequenz bestimmt [19]. Als Unsicherheit dieses Zahlenwerts wurde 20 angegeben, eine vermutlich sehr optimistisch abgeschätzte Zahl, die praktisch vollständig durch die astronomische Bestimmung der Ephemeriden-Sekunde bestimmt war. Dessen ungeachtet wurde dieser Zahlenwert von der CGPM in 1964 „for temporary use“ empfohlen[†] und bildete die Grundlage der 1967 von der 13. CGPM beschlossenen und bis heute gültigen Definition der Zeiteinheit im Internationalen Einheitensystem (SI). Mit den beteiligten Gremien werden wir uns im folgenden Kapitel beschäftigen.

4. Das Faktische bestimmt das Geschehen

Die Sekunde ist die Einheit der Zeit im Internationalen Einheitensystem SI, welches in der Zeit von 1948 bis 1960 von den Organen der Meterkonvention entwickelt und eingerichtet wurde. Letztere wurde 1875 auf Grundlage einer internationalen Vereinbarung von zunächst 17 Staaten geschaffen, mit dem Grundsatz: «*A tous les temps, à tous les peuples*», also: „Für alle Zeiten, für alle Völker“^{***}. Die Organe sind: Das Internationale Büro für Maß und Gewicht BIPM (von *Bureau international des poids et mesures*), sozusagen das ausführende Organ praktischer Arbeit

mit Laboratorien für die wesentlichen Felder der Metrologie, mit Sitz in Sèvres bei Paris. 18 Delegierte aus verschiedenen Ländern bilden das Internationale Komitee für Maß und Gewicht CIPM (von *Comité international des poids et mesures*), welches jährlich tagt und die Arbeit des BIPM überwacht. Das CIPM macht Empfehlungen an die Generalkonferenz für Maß und Gewicht CGPM (von *Conférence générale des poids et mesures*), bei der sich Delegierte aller Unterzeichnerstaaten der Meterkonvention im Abstand von vier bis sechs Jahren treffen. Das CIPM hat eine Reihe von beratenden Komitees (CCs, von *Comité consultatif*), die sich aus im jeweiligen Feld der Metrologie anerkannten Experten zusammensetzen. Im Jahr 1955 gab es ein solches Komitee im Bereich Zeit und Frequenz noch nicht, und es dauerte noch bis 1988 ehe überhaupt dieses Arbeitsgebiet in das BIPM eingegliedert wurde [7]. Zeit und Frequenz waren für Generationen fest in der Hand der Astronomen, und das Internationale Büro für die Zeit (BIH, von *Bureau international de l'heure*) mit Sitz am *Observatoire de Paris* (OP) kümmerte sich seit 1912 um Erdrotation, Referenzsysteme und in den letzten Jahren bis 1988 auch um Atomzeitskalen [20]. Zwar hatte das CIPM auf seiner Sitzung im Jahr 1956 gerade die aus heutiger Sicht wenig hilfreiche Definition der Ephemeriden-Sekunde als Teil des SI auf den Weg gebracht – die dann erst 1960, also 5 Jahre nach dem Ticken der ersten Atomuhr, von der CGPM sanktioniert wurde. Allerdings wurde auch der Weg für die Schaffung eines „Beratenden Komitees für die Definition der Sekunde“ (CCDS) freigemacht (siehe Anhang 1). Dieses tagte dann erstmals im Juni 1957 am BIPM unter der Leitung seines ersten Präsidenten, des Direktors des OP, A. Danjon^{***}. Es wird naturgemäß über die Uhr des NPL berichtet, über bereits 6 Atomichrons, von denen offenbar eines am NPL und eines in einer französischen Forschungseinrichtung der Telekom betrieben wurde. Auch die anderen Kandidaten für Atomuhren werden vorgestellt. Viel Zeit nehmen zwei mehr grundsätzliche Fragen ein: Worüber reden wir überhaupt? Die Astronomen möchten den Begriff „Uhr“ und auch den Bezug zu Zeit und Zeitskalen einstweilen vermeiden, und man einigt sich auf „atomares Frequenznormal“ (*étalon atomique de fréquence*).

Sollte man den Wert der Übergangsfrequenz des Caesiumübergangs provisorisch festlegen? Die Mehrheit, darunter auch A. Scheibe von der PTB, ist dagegen. „Es gibt so viele Caesiumfrequenzen wie es solcher Art Uhren gibt“ (siehe Anhang 1). Nun, das sollte ja gerade nicht so sein, aber das Atomichron des NPL unterschied sich in der Tat zeitweise von der Uhr NPL-Cs1 um $9 \cdot 10^{-10}$. Eine Empfehlung (*Récommandation*), die an verschiedenen Orten betriebenen Atomuhren über Langwellen- und Längstwellensignale zu vergleichen, wurde verabschiedet [20].

^{*} Siehe hierzu R. Vieweg, 12. CGPM, in Anhang 1

^{**} Das SI-System – und insbesondere seine aktuell diskutierte Weiterentwicklung – waren Gegenstand des Heftes 2/2016 der PTB-Mitteilungen.

^{***} Alle CCDS-Sitzungsberichte sind zugänglich unter <http://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/publications-cc.html> (Zugriff Juni 2017); auf individuelle Zitate wird daher verzichtet

In den Jahren bis zur zweiten Sitzung des CCDS im April 1961 ist viel geschehen, entsprechend groß ist die Anzahl der Beiträge verschiedener Institute über Fortschritte der Atomuhren-Entwicklung: Caesium, Thallium und Wasserstoff sind Kandidaten, Vergleiche zwischen Atomchrons und Labornormalen haben am NBS und dem NPL stattgefunden, die relativen Abweichungen liegen bei $2 \cdot 10^{-10}$. Zwischen den Normalen NBS-1 und NBS-2 wurde eine Abweichung von weniger als $2 \cdot 10^{-11}$ gefunden, aber es wird festgehalten, dass ein internationaler Vergleich mit dieser Genauigkeit bislang unmöglich ist. Beide Zahlenwerte sind um mindestens eine Größenordnung kleiner als die relative Unsicherheit, mit der man die Dauer der Ephemeriden-Sekunde bei Beobachtungen über wenige Jahre bestimmen kann. Diese Aussagen sind verstreut in den *Procès-Verbaux* der Sitzung, einem Bericht des Schriftführers an das CIPM, aber überwiegend in den Beiträgen der einzelnen Institute. Nur im Bericht des USNO wird die Bestimmung der Caesiumfrequenz zu 9 192 631 770 Hz überhaupt erwähnt, das erscheint etwas verwunderlich.

Andere Diskussionspunkte muten uns heute ebenfalls seltsam an: Ob man sich überhaupt mit Zeitskalen und deren Vergleich befassen sollte, da die CGPM nur ein Mandat für die Befassung mit der fundamentalen Zeiteinheit gegeben habe? Das stelle eine zu enge Sichtweise dar, meinen andere: Jeder, der ein Atomfrequenznormal betreibt, realisiere damit auch eine Zeitskala. Man müsse sich international auf eine einigen und Skalenmaß und -beginn standardisieren. Es dauerte bis 1999, ehe das *Comité consultatif* in «*du temps et des fréquences*» umbenannt wurde – so lange lag der Bezeichnung nach der Fokus auf «*Definition de la seconde*».

Für einen Wortlaut der Neuen Definition gibt es Vorschläge im Annex 4 des Berichts, sie sind im Anhang 1 zu finden.

Das Fazit der Sitzung hatte L. Essen (NPL) gleich vorweggenommen: Atomuhren seien schon heute (1961) besser als astronomische Methoden der Zeitbestimmung – und damit sei es Zeit für eine Neudefinition. Aber welches Atom verwenden?

In der dritten Sitzung des CCDS im Dezember 1963 wurde eine Vielzahl von Argumenten ausgetauscht, ob der rechte Zeitpunkt für eine Neudefinition der Sekunde gekommen sei, falls ja, basierend auf welchem Element und mit welchem Wortlaut. Hätte es zu dem Zeitpunkt schon Einigkeit gegeben, so hätte die im darauffolgenden Jahr stattfindende 12. Sitzung des CGPM vermutlich entsprechend entschieden. Aber zu zahlreich waren noch die Zweifel und die widersprüchlichen Interessen zu bedeutend. In der Tat: Die Definition einer Einheit muss wohlüberlegt sein. Sie spezifiziert einen numerischen Wert, hier die Dauer des fundamentalen Zeitintervalls, und muss als Richtschnur für die praktische Realisierung in einem Normal dienen.

Mit der Realisierung der Einheit in einem Normal kommt man dem idealisierten Konzept nahe, aber wie nahe? Hier kommen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Kandidaten ins Spiel. Kennt man die verschiedenen Einflussgrößen auf die mit dem Normal realisierte Zeiteinheit vollständig und kann sie hinreichend genau bestimmen? Die Vertreter des Wasserstoffmasers waren hier sehr optimistisch, aber es waren zu dem Zeitpunkt nur zwei Gruppen tätig, und es gab nur Vergleiche zwischen Masern aus dem gleichen Haus. Dagegen waren die Entwickler von Caesiumuhren anscheinend konservativer, sie konnten aber überwiegend Übereinstimmung verschiedener Normale im Rahmen der Vergleichsmöglichkeiten über den Empfang von Längstwellen- und Langwellensendern berichten. Zusammengefasst gab es die folgenden Argumente:

Änderung sofort:

- Die Caesiumnormale sind eindeutig um zwei Größenordnungen reproduzierbarer und stabiler als mit astronomischen Beobachtungen erreichbar;
- De facto wird die Cs-Sekunde (mit 9 192 631 770 Hz) verwendet, auch wenn das noch nicht offiziell beschlossen war – das geschah erst durch die CGPM 1964;
- Wenn man auf weitere Fortschritte in der Uhrenentwicklung warten will, dann kommt man nie zu einer Entscheidung, denn es wird immer weitere Fortschritte geben.
- Wenn man zu einem späteren Zeitpunkt einen besseren Kandidaten findet, dann kann man seine Frequenz mit Bezug auf die de facto Caesiumfrequenz bestimmen und definieren.

Änderung jetzt noch nicht:

- Man weiß noch zu wenig über Atomuhren;
- Mit der Festlegung auf Caesium zum jetzigen Zeitpunkt demotiviert man Forschung an Thallium und Wasserstoff;
- Solange man noch Zweifel an der besten Eignung des Caesiums hat, sollte man warten.

Zu guter Letzt wird fast einstimmig (bei zwei Gegenstimmen von Astronomen und einer Enthaltung) eine *Récommandation* (S1) verfasst, siehe Annex 1.

Aus den Jahren unmittelbar danach ist rege Kommunikation (per Post) erhalten. Hewlett-Packard bringt seine deutlich verbesserte und praktikablere kommerzielle Uhr auf den Markt,

die dann in so großen Stückzahlen verkauft wird, dass man bald über ein recht gutes statistisches Ensemble verfügt. Uhrentransporte (siehe nächster Abschnitt) belegen die Übereinstimmung der Normale am NBS mit denen in Europa. Neubestimmungen der Caesium-Hyperfeinstrukturfrequenz mit Bezug auf die Ephemeriden-Sekunde ergeben keinen signifikant anderen Wert als den zuvor festgelegten. Trotzdem füllt der Schriftverkehr vor und zum Teil nach der 4. CCDS-Sitzung (12. + 13. Juli 1967) fast einen Leitzordner im Zeitlabor der PTB. Es geht nun um den Wortlaut: Sollte man bestimmte Randbedingungen der Realisierung explizit erwähnen (Magnetfeld, Atome in Ruhe, Gravitationsfeld)? Soll die Sekunde in einem bestimmten Gravitationspotential definiert werden? Gerhard Becker aus der PTB hat in seinen schriftlichen Beiträgen vehement für zwei Prinzipien gestritten – und sich durchgesetzt:

Der Definitionstext legt den idealisierten Wert der Caesium-Hyperfeinstrukturfrequenz fest und gilt daher für ungestörte Atome – egal, welche Störungen man kennt bzw. in der Zukunft noch findet.

Die Definition legt die Sekunde der Eigenzeit (*proper time*) fest und gilt daher in jedem Gravitationspotential unabhängig von dessen Wert.

Der Rapport der 4. Sitzung des CCDS aus dem Juli 1967 ist der dünnste aller bis dato vorliegenden. Es war vorab schon alles gesagt. Die verabschiedeten Empfehlungen 1 und 2 wurden dann wörtlich in die Resolution der 13. CGPM im

Jahr 1967 übernommen (siehe Annex 1).

Während der Sitzung wurde Herr Becker gebeten, seine diversen Einlassungen zu der relativistisch korrekten Formulierung noch einmal zusammenzufassen. Er schickte diesen Text dann in französischer Sprache mit Brief vom 21. Juli an Dr. J. Terrien, Direktor des BIPM. Er ist dann als Annexe 4 im Rapport abgedruckt. Darin schlägt er vor, dass für metrologische Anwendungen auf der Erde eine koordinierte Zeitskala, *Temps terrestre* (TT), etabliert werden sollte. Die Internationale Astronomische Union übernahm im Jahr 2000 genau diesen Begriff, und die Internationale Atomzeit TAI ist die Realisierung von TT [7]. Beckers Argumente findet man auch in [21].

5. Die Rolle der PTB

Bis zur Entscheidung zur Neudefinition der Sekunde im Jahr 1967 ist die PTB nicht sonderlich mit eigenen Beiträgen hervorgetreten. Im „Bericht über die Tätigkeiten der PTB im Jahr 1958“ berichten zwei Kollegen, W. Schaffeld und H. Bayer, über den „Aufbau eines Cs-Resonators für genaue Zeitmessung“. Auf der ersten Sitzung des CCDS in 1957 hatte der Vertreter der PTB die Fertigstellung einer Caesium-Atomuhr in der PTB für das Folgejahr angekündigt. Als Eingangsdokument zur 2. Sitzung des CCDS 1961 berichteten Schaffeld und Bayer über Details, ohne dass eindeutig erkennbar wurde, bis zu welchem Stadium die Entwicklung fortgeschritten war. Danach

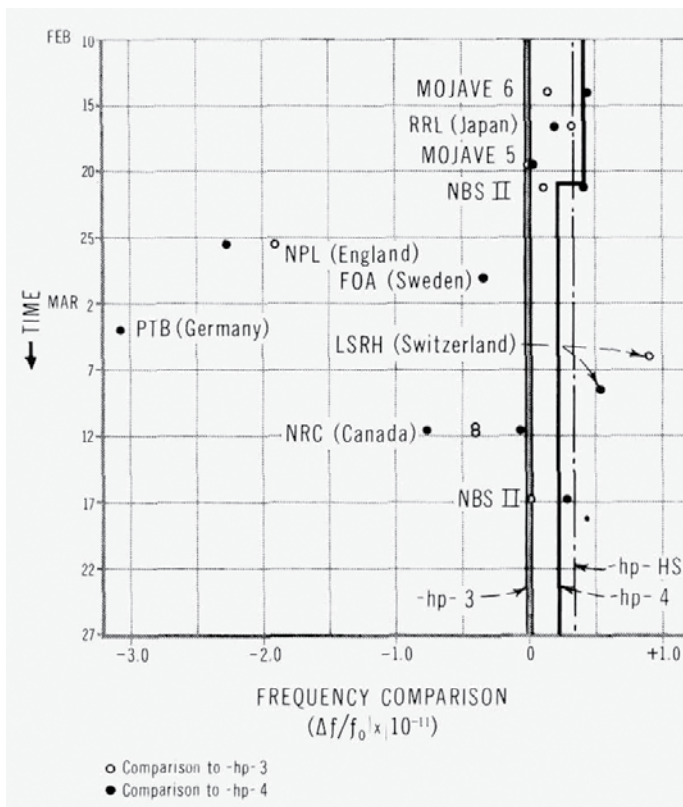


Fig. 9. Frequency comparisons between traveling clocks and other cesium-beam standards are plotted here as frequency differences in parts per 10¹¹. Offset of -150×10^{10} of standards operating on Universal Time has been removed to show only fundamental frequency differences. Results of measurements on all standards shown are well within known accuracies of individual standards.

Bild 3: Ergebnis der Frequenzvergleiche zwischen zwei reisenden Uhren, hp-3 und hp-4 und den Normalen von NBS, NPL, LSRH und dem kanadischen NRC, das inzwischen auch eine Eigenentwicklung vorweisen konnte, sowie kommerziellen Uhren in anderen Instituten, darunter der PTB. Abbildung aus [22]. Mit Erlaubnis der Hewlett-Packard Company.

bestand das Vakuumgefäß, in dem der Atomstrahl fliegen sollte, aus einer 4 Meter langen Glasröhre mit 11 mm Innendurchmesser, die Magnete A und B waren Elektromagnete und der Ramsey-Resonator hatte eine Ausdehnung von 1,1 Meter. Damit erwartete man eine Linienbreite von ca. 120 Hz. Leider verlieren sich damit alle weiteren Spuren dieses Projekts.

Auf der gleichen Sitzung wurde seitens der PTB angekündigt, dass in naher Zukunft die Frequenz der Quarzuhren der PTB mithilfe eines Atomichrons verglichen werden sollte. Die ersten Messungen sind für das Jahr 1962 dokumentiert. Wie im vorangehenden Kapitel erwähnt, fanden Vergleiche zwischen den in verschiedenen Einrichtungen betriebenen Atomuhren statt, von denen die ersten von Hewlett-Packard organisiert wurden, nachdem das neue Modell HP-5060 verfügbar war. Zwei Besuche in der PTB sind dokumentiert, für März 1965 [22] und für Juni 1966 [23]. Bild 3 aus [22] zeigt die Ergebnisse von Frequenzvergleichen, darunter die mit der als „90 cm commercial“ bezeichneten Uhr der PTB. Der entsprechende Bericht aus dem Jahr 1966 bezeichnet die Uhr der PTB als „Lab Type“ ohne nähere Angaben, vermutlich handelt es sich hier um einen Irrtum.

Mitte der sechziger Jahre begannen unter Leitung von Gerhard Becker die letztlich erfolgreichen Bemühungen, in der PTB eine eigene

Caesium-Atomuhr zu entwickeln. In der Uhr CS1 (s. Bild 4) setzte man neue Ideen von Holloway und Lacey [24] um. Im Vergleich zu den existierenden Normalen des NPL, des NBS und des LSRH und damit auch zu dem in Anhang 2 gezeigten Prinzip ergab sich eine signifikant andere Konstruktion. Als wesentliche Vorteile wurden erachtet:

- eine reduzierte Frequenzinstabilität durch zweidimensionale Fokussierung der Atome mit magnetischen Linsen (statt der bisher verwendeten Dipolmagnete),
- axialsymmetrische Geometrie des Atomstrahls mit kleiner radialer Ausdehnung,
- Verringerung der Inhomogenität des C-Felds durch Verwendung einer langen Zylinderspule und zylindrischer Abschirmungen – statt eines Magnetfelds quer zur Strahlrichtung.

CS1 wurde aufgebaut und 1969 erstmals benutzt [25] und tickt bis heute. Weltweit sind derzeit nur noch zwei primäre Uhren mit thermischem Atomstrahl in Betrieb, CS1 und CS2 der PTB. CS2 wurde 1985 fertiggestellt, und ihr Konstruktionsprinzip ist dem von CS1 sehr ähnlich. Die



Bild 4:
Die primäre Atomstrahluhr CS1 in der Atomuhrenhalle der PTB (1969).

gegen Ende der 1980er Jahre für CS2 abgeschätzte Unsicherheit liegt bei $1,2 \cdot 10^{-14}$ [26], also etwa 4 Größenordnungen unter dem Wert der ersten funktionierenden Caesium-Atomuhr. Sie wurde durch Vergleich mit der überlegen genauen Caesium-Fontänenuhr der PTB bestätigt.

6. Die Weiterentwicklung der Caesium-Atomuhr

Jêrome Zacharias vom MIT war der wissenschaftliche „Vater“ des Atomichron, doch er arbeitete bereits in den 1950er-Jahren daneben an einem ambitionierten, doch leider erfolglosen Experiment mit einem aufwärts gerichteten thermischen Atomstrahl. Unter dem Einfluss der Schwerkraft verlangsamten sich in einem solchen Strahl zunächst die Atome, bevor sie nach dem Umkehrpunkt nach unten beschleunigt werden. Zacharias wollte die wenigen besonders langsamen Atome im thermischen Strahl nachweisen, nachdem sie während der Auf- und Abwärtsbewegung mit dem Mikrowellenfeld in Wechselwirkung getreten waren. So hätte sich bei einer mehrere Meter hohen Apparatur eine Linienbreite von unter 1 Hz ergeben, also wesentlich kleiner als die bis dato erreichten ≈ 100 Hz. Die Linienmitte der Resonanzkurve hätte sich so viel leichter auf 0,1 Hz, entsprechend relativ 10^{-11} der Resonanzfrequenz von 9,2 GHz, bestimmen lassen. Allerdings wurde durch Stöße der Atome im Bereich der Ofendüse der winzige, für das Experiment nutzbare, Anteil der extrem langsamen Atome in der thermischen Geschwindigkeitsverteilung noch weiter reduziert. Erhalten geblieben ist der Name „*Fountain*“, den schon Zacharias verwendete.

Ein „*Zacharias fountain*“ konnte erst Realität werden, seit man die Manipulation der Bewegung von Atomen durch Laserstrahlung, speziell die sogenannte Laserkühlung, beherrscht [27]. Durch Laserkühlung lassen sich in einer Zelle mit atomarem Gas Wolken kalter Atome erzeugen, in denen die thermische Bewegung der Atome weitgehend „eingefroren“ ist. Die Temperatur der kalten Atome beträgt dann etwa $1 \mu\text{K}$, und die Verteilung der vorkommenden Relativgeschwindigkeiten ist etwa 10.000-mal schmaler als die thermische Geschwindigkeitsverteilung eines Gases der gleichen Atomsorte bei Raumtemperatur. Es ist ein glücklicher Zufall, dass dies sehr gut mit Caesiumatomen erreicht werden kann. Denn die zur Laserkühlung benötigte schmalbandige und abstimmbare Laserstrahlung bei 852 nm Wellenlänge ist seit gut 20 Jahren mit vergleichsweise einfachen und kompakten Lasern zu erzeugen. Es ist heute Stand der Technik, Fontänenuhren mit vorbestimmter Flughöhe von ca. 1 m der kalten Atome zu realisieren, wobei die räumliche Aufweitung der Wolke mit der Zeit wegen der

schmalen Geschwindigkeitsverteilung gering bleibt. Details findet man in [8, 28]. Die Zeit zwischen den zwei Mikrowellenbestrahlungen beim Durchtritt durch den Mikrowellenresonator im Flug, zunächst aufwärts, dann abwärts, die effektive Wechselwirkungszeit, beträgt in praktisch allen bisher realisierten Fontänenuhren etwa 0,6 s. Die Linienbreite des Uhrenübergangs liegt dann bei 0,8 Hz. Die PTB betreibt derzeit zwei solcher Fontänenuhren, von denen CSF2 im Bild 5 abgebildet ist. Primäre Uhren dieser Art wurden in den Metrologieinstituten von China, Frankreich, Italien, Japan, Russland und den USA entwickelt. Die kleinste abgeschätzte relative Unsicherheit, mit einem solchen Primärnormal die SI-Sekunde zu realisieren, liegt derzeit bei unter $2 \cdot 10^{-16}$.

Bild 5:
Die Caesium-Fontänenuhr der PTB CSF2 (2017)



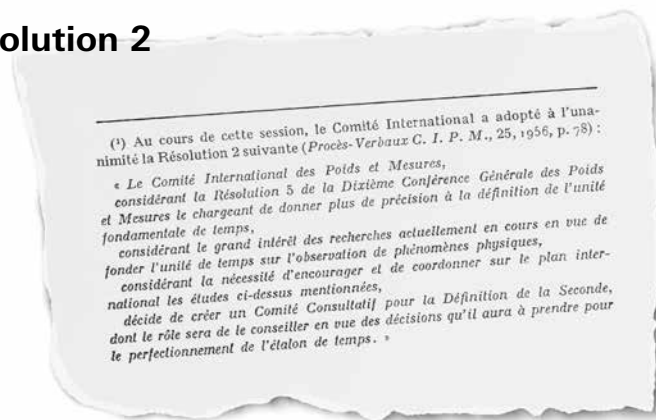
7. Zusammenfassung

Die Caesium-Atomuhr entstand in den 1950er-Jahren und stellte wissenschaftlich wie technisch einen solchen „Quantensprung“ dar, dass Metrologieinstitute, Forschungseinrichtungen, aber auch die Industrie sofort das damit verknüpfte Potenzial erkannten. Zwar gab es andere „Kandidaten“ für eine Neudefinition der Sekunde, aber die im Jahr 1967 getroffene Entscheidung war auch im Rückblick richtig und weitsichtig. Der ursprüngliche Text der Definition war so allgemein formuliert, dass er trotz der Weiterentwicklung der Atom-

uhren über die Jahre von 1955 bis heute nicht in Frage gestellt werden musste. Während dieser Jahre wurde die relative Unsicherheit, mit der die SI-Einheit der Zeit realisiert werden kann, von ca. 10^{-10} bis auf fast 10^{-16} reduziert. Dass es „besser“ geht, wurde gezeigt und ist Gegenstand des Artikels von Ekkehard Peik in diesem Heft. Aber ich sehe derzeit keinen Handlungsbedarf für eine Neudefinition der Sekunde: Für die aktuell gültige gilt weiterhin, dass sie den aktuellen Bedürfnissen entspricht (CGPM 1967, am Ende von Anhang 1).

Anhang 1

CIPM 1956, Résolution 2



„In Anbetracht der Resolution 5, in der die Zehnte Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) damit beauftragt hat, die Basiseinheit der Zeit mit größerer Genauigkeit zu definieren,

und in Anbetracht der großen Bedeutung der aktuell laufenden Untersuchungen, die das Ziel haben, die Einheit der Zeit auf der Beobachtung physikalischer Phänomene zu begründen,

...

beschließt das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) die Schaffung eines „Beratenden Komitees für die Definition der Sekunde“. Die Aufgabe dieses Komitees wird es sein, das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) bei Entscheidungen zur Verbesserung des Zeitnormals zu beraten.“

CCDS_1 (1957)

Sollte man einen Wert für die Caesium-Übergangsfrequenz empfehlen?

„Herr Essen vom NPL bleibt bei seiner Ansicht, dass es eine nutzbringende Aufgabe dieses Komitees wäre, Verwirrungen zu vermeiden, indem ein Zahlenwert festgelegt wird, um die Frequenzaussendungen der verschiedenen Stationen zu koordinieren.

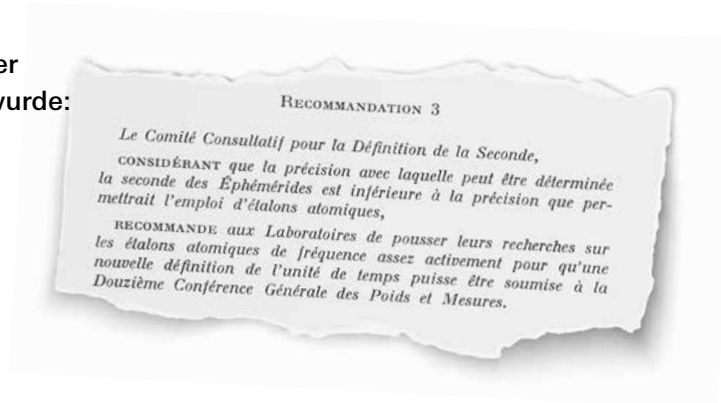
Markowitz [USNO]: Nein, ... es gibt genauso viele Caesiumfrequenzen wie es Caesiumapparaturen gibt.“

« Mr. Essen [NPL] reste d'avis qu'une tâche utile de ce Comité serait d'éviter des confusions, grâce à l'adoption d'une valeur qui servirait à coordonner les émissions de fréquence des diverses stations.

Markowitz [USNO] Non, ... il y a autant de fréquences du césium que d'appareils à césium. »

CCDS-2 (1961)

Eine Empfehlung, die sinngemäß seither in vielen CC Sitzungen verabschiedet wurde:

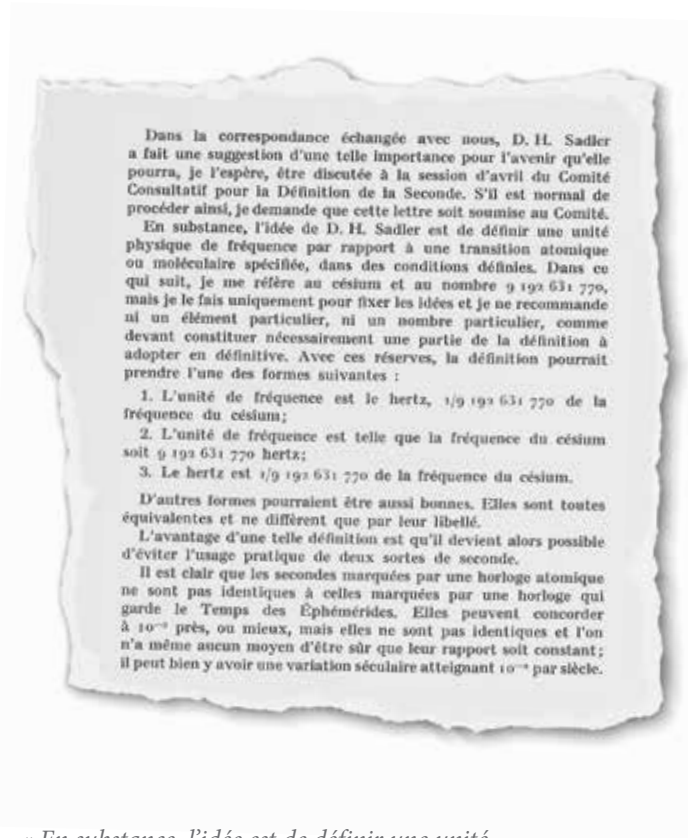


„Empfehlung 3:

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Genauigkeit, mit der die Ephemeriden-Sekunde bestimmt werden kann, geringer ist als die Genauigkeit, die die Verwendung von atomaren Normalen erlauben würde, empfiehlt das „Beratende Komitee für die Definition der Sekunde“ (CCDS)

den Laboratorien, ihre Forschungen zu den atomaren Frequenznormalen aktiv voranzutreiben, damit der Zwölften Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) eine neue Definition der Einheit der Zeit vorgelegt werden kann.

Stellungnahme eines Astronomen vom USNO in dieser Sitzung:



„Im Wesentlichen besteht die Idee darin, eine physikalische Frequenzeinheit mit Bezug auf einen atomaren oder molekularen Übergang unter bestimmten Bedingungen zu definieren. Im Folgenden beziehe ich mich zwar auf Caesium und auf die Zahl 9 192 631 770 – dies allerdings nur, um erst einmal ganz allgemein Ideen festzuhalten. Tatsächlich empfehle ich weder, dass ein bestimmtes Element, noch dass eine bestimmte Zahl in der Definition enthalten sein muss, die letzten Endes festgelegt wird. Berücksichtigt man diese Einschränkungen, so könnte die Definition eine der folgenden Formen annehmen:

1. Die Einheit der Frequenz ist das Hertz, $1/9\,192\,631\,770$ der Caesiumfrequenz.
2. Die Einheit der Frequenz wird so gewählt, dass die Caesiumfrequenz den Wert 9 192 631 770 Hertz hat.
3. Das Hertz beträgt $1/9\,192\,631\,770$ der Caesiumfrequenz.

Andere Formen könnten ebenso gut sein. Sie sind alle gleichwertig und unterscheiden sich nur in ihrem Wortlaut.

...

« En substance, l'idée est de définir une unité physique de fréquence par rapport à une transition atomique ou moléculaire spécifiée, dans des conditions définies. Dans ce qui suit, je me réfère au césium et au nombre 9 192 631 770, mais je le fais uniquement pour fixer les idées et je ne recommande ni un élément particulier, ni un nombre particulier,

...

...

Durch eine solche Definition würde verhindert, dass in der Praxis zwei Arten von Sekunden verwendet werden.

Es ist klar, dass die Sekunden einer Atomuhr nicht identisch mit den Ephemeriden-Sekunden sind. Sie können zwar auf fast 10^{-9} – oder besser – übereinstimmen, aber sie sind nicht identisch und man kann nicht einmal sicher sein, dass ihr Verhältnis konstant ist; ein Unterschied von bis zu 10^{-8} im Verlauf von hundert Jahren ist durchaus möglich.

Ebenso klar ist, dass die beiden Uhrentypen auch weiterhin verwendet werden. Der Astronom benötigt die Ephemeriden-Sekunde, auf der die dynamische Astronomie beruht. Der Physiker hingegen benötigt die – leicht für das Labor zugängliche – Atomuhr. Die Gesetzgebung kann keine dieser Tatsachen verändern.

Aber Astronomen und Physiker sind keine unterschiedlichen Spezies und leben nicht auf unterschiedlichen Planeten. Die Handlungen der einen beeinflussen die Handlungen der anderen, und manchmal sind Physiker und Astronomen sogar in einer einzigen Person vereint. Doch würde die Verwendung eines einzigen Wortes für zwei grundsätzlich unterschiedliche physikalische Konzepte mit Sicherheit zu Verwirrung und falschen Interpretationen führen.

Für den Astronomen ist das Grundkonzept bei der Bestimmung der Zeit die Epoche (der Zeitpunkt einer Beobachtung) – er erhält die Frequenz durch Ableitung. Für den Physiker ist das Grundkonzept die Frequenz – er erhält die Zeit durch Integration, unter Verwendung der vom Astronomen gelieferten Konstanten (dem Anfangswert der Integration).

Es ist daher völlig logisch und mit den Grundbedürfnissen der beiden Wissenschaften konform, die Einheit der Zeit mithilfe astronomischer Abläufe und die Einheit der Frequenz mithilfe physikalischer Abläufe zu definieren. Dadurch geht nichts verloren, sondern man gewinnt dadurch sogar an Eindeutigkeit sowie an Kürze bei der Beschreibung und an sprachlicher Genauigkeit.“

...

comme devant constituer nécessairement une partie de la définition à adopter en définitive. Avec ces réserves, la définition pourrait prendre l'une des formes suivantes :

L'unité de fréquence est le hertz, $1/9\,192\,631\,770$ de la fréquence du césium ;

L'unité de fréquence est telle que la fréquence du césium soit $9\,192\,631\,770$ hertz ;

Le hertz est $1/9\,192\,631\,770$ de la fréquence du césium.

D'autres formes pourraient être aussi bonnes. Elles sont toutes équivalentes et ne diffèrent que par leur libellé. L'avantage d'une telle définition est qu'il devient alors possible d'éviter l'usage pratique de deux sortes de seconde.

Il est clair que les secondes marquées par une horloge atomique ne sont pas identiques à celles marquées par une horloge qui garde le Temps des Éphémérides. Elles peuvent concorder à 10^{-9} près, ou mieux, mais elles ne sont pas identiques et l'on n'a même aucun moyen d'être sûr que leur rapport soit constant ; il peut bien y avoir une variation séculaire atteignant 10^{-8} par siècle.

Il est clair également que les deux sortes d'horloges continueront d'être utilisées. La seconde de Temps des Éphémérides sur laquelle repose l'astronomie dynamique est nécessaire à l'astronome. L'horloge atomique, facilement disponible au laboratoire, est nécessaire au physicien. La législation ne peut modifier aucun de ces faits.

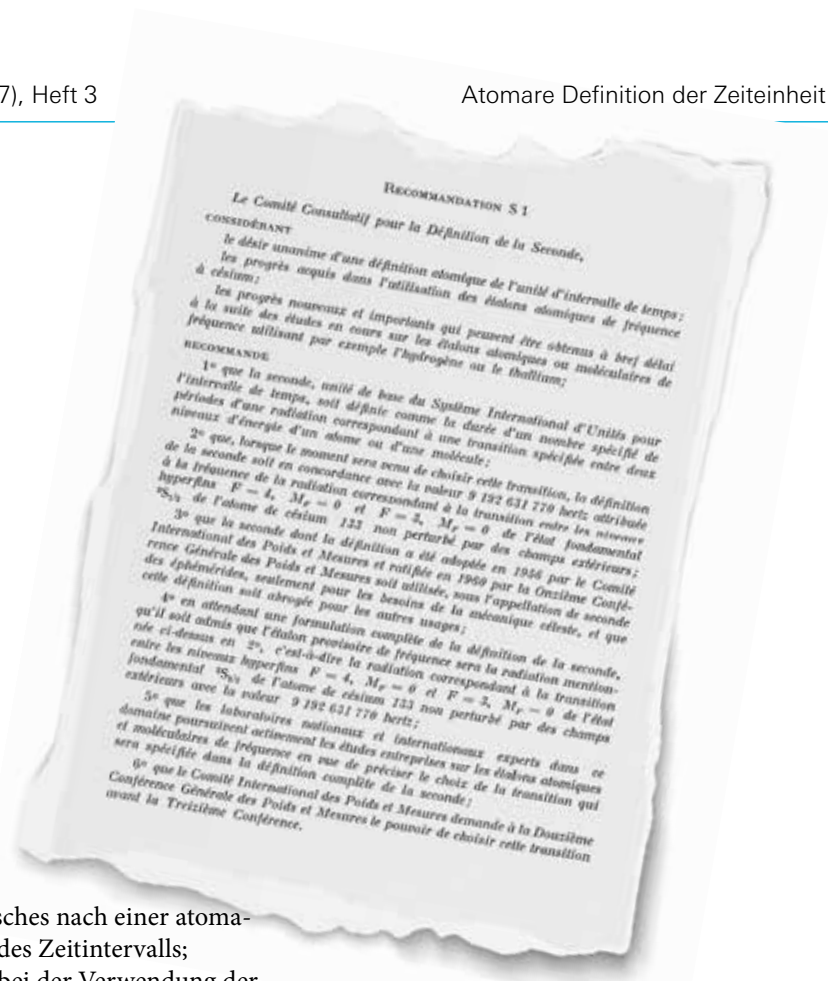
Mais les astronomes et les physiciens ne sont pas deux races distinctes habitant des planètes différentes. Les actions des uns influent sur celles des autres et, parfois, le physicien et l'astronome sont réunis en une seule personne. Il est certain que l'emploi d'un seul mot pour désigner deux concepts physiques fondamentalement différents doit produire des confusions et de fausses interprétations.

Pour l'astronome, le concept fondamental dans la conservation du temps est l'époque ; il obtient la fréquence par dérivation. Pour le physicien, le concept fondamental est la fréquence ; il obtient le temps par intégration, en utilisant des constantes fournies par l'astronome.

Il est donc tout à fait logique, et en accord avec les besoins fondamentaux des deux sciences, de définir l'unité de temps par des opérations propres à l'astronomie et l'unité de fréquence par des opérations propres à la physique. Par ce moyen rien n'est perdu et ce que l'on gagne c'est l'absence de risque de confusion, l'économie dans la description et la précision du langage. »

CCDS-3 (1963)

Recommendation S 1



„Unter Berücksichtigung

- des einhelligen Wunsches nach einer atomaren Definition der Einheit des Zeitintervalls;
 - der erzielten Erfolge bei der Verwendung der atomaren Caesiumfrequenznormale,
 - der neuen und bedeutenden Fortschritte, die innerhalb kurzer Zeit als Ergebnis laufender Untersuchungen an anderen atomaren Normalen (Wasserstoff, Thallium) gemacht werden können,
- empfiehlt das „Beratende Komitee für die Definition der Sekunde“ (CCDS),

1. die Sekunde (die Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems (SI) für das Zeitintervall) als die Dauer einer bestimmten Periodenanzahl einer Strahlung zu definieren, die einem bestimmten Übergang zwischen zwei Energieniveaus eines Atoms oder Moleküls entspricht,
2. dass – wenn der Zeitpunkt gekommen ist, diesen Übergang zu wählen – die Definition der Sekunde mit dem Wert 9 192 631 770 Hertz übereinstimmen soll, der der Frequenz der Strahlung zugeordnet ist, welche dem Übergang zwischen den Hyperfeinstruktur-niveaus $F=4, M_F=0$ und $F=3, M_F=0$ des Grundzustands $^2S_{1/2}$ des Atoms 133-Caesium ohne Störung durch äußere Felder entspricht.
3. ...
4. dass die oben genannte Strahlung provisorisch als Frequenznormal zugelassen wird, bis eine endgültige Definition der Sekunde erfolgt ist,
5. ...
6. dass das Internationale Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) die Zwölfte Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) um Befugnis bittet, diesen Übergang zu wählen, bevor die Dreizehnte Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) stattfindet.“

« Le CCDS, considérant

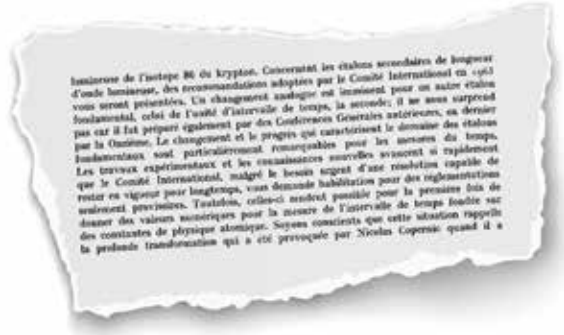
- le désir unanime d'une définition atomique de l'unité d'intervalle de temps ;
- les progrès acquis dans l'utilisation des étalons atomiques de fréquence à césium,
- les progrès nouveaux et importants qui peuvent être obtenus à bref délai à la suite des études en cours sur les étalons atomiques .. (hydrogène, thallium)

Recommande

1. que la seconde, unité de base du Système International d'Unités pour l'intervalle de temps, soit définie comme la durée d'un nombre spécifié de périodes d'une radiation correspondant à une transition spécifiée entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule,
2. - que, lorsque le moment sera venu de choisir cette transition, la définition de la seconde soit en concordance avec la valeur 9 192 631 770 hertz attribuée à la fréquence de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F=4, M_F=0$ et $F=3, M_F=0$ de l'état fondamental $^2S_{1/2}$ de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs;
3. ...
4. en attendant une formulation complète de la définition de la seconde, qu'il soit admis que l'étalon provisoire de fréquence sera la radiation mentionnée ci-dessus...
5. ...
6. que le CIPM demande à la 12. CGPM le pouvoir de choisir cette transition avant la 13. CGPM. »

12. CGPM Sitzung : 6. – 13. Oktober 1964

aus der Eröffnungsrede von Richard Vieweg, Präsident der PTB und des CIPM :



„Die im Bereich der Basisnormale erzielten Änderungen und Fortschritte sind insbesondere bei der Zeitmessung bemerkenswert. Die experimentellen Arbeiten und die neuen Erkenntnisse schreiten so schnell voran, dass das Internationale Komitee Sie bittet, trotz des dringenden Bedarfs nach einer Resolution, die von langfristiger Dauer sein wird, vorab schon einmal provisorische Regelungen treffen zu dürfen. Dadurch würde es zum ersten Mal möglich, Zahlenwerte für die Messung der Dauer von Zeitintervallen anzugeben, welche auf den Konstanten der Atomphysik beruhen. Wir sollten uns bewusst sein, dass diese Situation an die tiefgreifende Umwandlung erinnert, die von Nikolaus Kopernikus hervorgerufen wurde, als er das klassische Weltbild mit der Erde als Zentrum durch sein neues, heliozentrisches System ersetzte. Heute sind wir im Begriff, die Zeit nicht nur durch die Bewegung der Planeten im Sonnensystem messen zu können, sondern auch durch die Bewegung der Elektronen in einem atomaren System.“

Le changement et le progrès qui caractérisent le domaine des étalons fondamentaux sont particulièrement remarquables pour les mesures du temps. Les travaux expérimentaux et les connaissances nouvelles avancent si rapidement que le Comité International, malgré le besoin urgent d'une résolution capable de rester en vigueur pour longtemps, vous demande habilitation pour des réglementations seulement provisoires. Toutefois, celles-ci rendent possible pour la première fois de donner des valeurs numériques pour la mesure de l'intervalle de temps fondée sur des constantes de physique atomique. Soyons conscients que cette situation rappelle la profonde transformation qui a été provoquée par Nicolas Copernic quand il remplace la mécanique céleste classique, avec la Terre comme centre, par son nouveau Système Héliocentrique. Aujourd'hui, nous sommes en train d'ajouter aux mesures du temps par le mouvement des planètes dans le système solaire, des mesures du temps par le mouvement des électrons dans le système atomique.

13. Sitzung der CGPM, Oktober 1967

RÉSOLUTIONS ADOPTÉES PAR LA 13^e CONFÉRENCE GÉNÉRALE

Systeme International d'Unités (SI)

Unité de temps (seconde)

RÉSOLUTION

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

CONSIDÉRANT

que la définition de la seconde décidée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1956 (Résolution 1) et ratifiée par la Résolution 9 de la Onzième Conférence Générale (1960), puis maintenue par la Résolution 5 de la Douzième Conférence Générale (1964) ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie,

qu'à sa session de 1964 le Comité International des Poids et Mesures, habilité par la Résolution 5 de la Douzième Conférence Générale (1964), a désigné pour répondre à ces besoins un étalon atomique de fréquence à césium à employer temporairement,

que cet étalon de fréquence est maintenant suffisamment éprouvé et suffisamment précis pour servir à une définition de la seconde répondant aux besoins actuels,

que le moment est venu de remplacer la définition actuellement en vigueur de l'unité de temps du Système International d'Unités par une définition atomique fondée sur cet étalon,

DÉCIDE

1^o L'unité de temps du Système International d'Unités est la seconde définie dans les termes suivants :

« La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ».

2^o La Résolution 1 adoptée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1956 et la Résolution 9 de la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures sont abrogées.

RÉSOLUTION 2

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

CONSIDÉRANT que l'étalon de fréquence à césium est encore perfectible et que des expériences en cours autorisent l'espoir de réaliser d'autres étalons ayant des qualités encore meilleures pour servir à définir la seconde,

INVITE les organisations et laboratoires experts dans le domaine des étalons atomiques de fréquence à poursuivre activement leurs études.

**„Die Dreizehnte Generalkonferenz
für Maß und Gewicht,
in Erwägung,**

dass die Definition der Sekunde, die vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht bei seiner Tagung von 1956 beschlossen (Resolution 1) und durch die Resolution 9 der Elften Generalkonferenz (1960) ratifiziert, dann durch die Resolution 5 der Zwölften Generalkonferenz (1964) beibehalten worden ist, den derzeitigen Erfordernissen der Metrologie nicht mehr genügt,

dass in seiner Sitzungsperiode von 1964 das Internationale Komitee für Maß und Gewicht, ermächtigt durch die Resolution 5 der Zwölften Generalkonferenz (1964), um diesen Erfordernissen Rechnung zu tragen, ein atomares Caesiumfrequenznormal zur vorläufigen Verwendung empfohlen hat,

dass dieses Frequenznormal jetzt ausreichend erprobt und als ausreichend genau anzusehen ist, um für eine Definition der Sekunde, die den derzeitigen Erfordernissen entspricht, zu dienen,

dass der Augenblick gekommen ist, die zur Zeit gültige Definition der Einheit der Zeit des Internationalen Einheitensystems durch eine auf diesem Normal beruhende atomare Definition zu ersetzen,

entscheidet,

1. Die Einheit der Zeit des Internationalen Einheitensystems ist die mit folgendem Wortlaut definierte Sekunde:
„Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.“
2. Die vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht bei seiner Tagung von 1956 angenommene Resolution 1 und die Resolution 9 der Elften Generalkonferenz für Maß und Gewicht sind aufgehoben.

Resolution 2

In Anbetracht der Tatsache, dass das Caesiumfrequenznormal noch vervollkommnungsfähig ist und laufende Experimente zur Hoffnung Anlass geben, dass weitere – für die Definition der Sekunde noch besser geeignete – Normale realisiert werden können,

ermuntert die Dreizehnte Generalkonferenz für Maß und Gewicht die Organisationen und Laboratorien, die Expertise auf dem Gebiet der Atomfrequenznormale haben, ihre Studien weiterhin aktiv zu betreiben.

Anhang 2

Die Funktion der Atomuhr, gezeigt am Beispiel der Caesium-Atomuhr

Atomare Übergänge, die in den 1950er Jahren für die Nutzung in einer Atomuhr diskutiert wurden, sollten folgende Eigenschaften haben:

- eine Übergangsfrequenz im Mikrowellenbereich, möglichst hoch, aber < 30 GHz
- Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen, z. B. durch elektrische und magnetische Felder
- Beobachtbarkeit des Übergangs mit langer Wechselwirkungszeit und einem hohen Signal-zu-Untergrund-Verhältnis.

Bild A2:
Cs-Uhr, schematische Darstellung;
 f_N : Normalfrequenz,
 f_p : Frequenz zur Bestrahlung der Atome, I_D : Detektorsignal, U_R : Signal zur Regelung des Quarzoszillators, links unten Detektorsignal I_D als Funktion der Frequenz des Mikrowellenfeldes f_p ; eingezeichnet ist die Linienbreite W .

Den vier Kandidaten, Wasserstoff (H), Rubidium (Rb), Caesium (Cs) und Thallium (Tl) gemeinsam ist die Elektronenkonfiguration: Im Grundzustand kommt es zur Kopplung zwischen dem Spin des einzelnen Leuchtelektrons in der Elektronenhülle des Atoms und dem halbzahligen Kernspin. Diese Kopplung führt zur sog. Hyperfeinstrukturaufspaltung des Grundzustands mit ganzzahligem Spin. Die beiden Unterzustände mit der magnetischen Quantenzahl $m_F=0$ definieren den sog. Uhrenübergang, dessen Übergangsfrequenz in erster Ordnung vom statischen Magnetfeld nicht beeinflusst wird. Die Über-

gangsfrequenzen liegen für die vier Elemente bei 1,42 GHz, 6,83 GHz, 9,19 GHz und 21,31 GHz, in der obigen Reihenfolge. Nachfolgend wird die Funktion der Caesium-Atomuhr anhand von Bild A2.1 beschrieben, das im Prinzip auch für die Thallium-Atomuhr gilt. Für Atomuhren mit Wasserstoff und Rubidium sind andere Konstruktionsarten notwendig, die in [2, 14] bzw. [16, 17] beschrieben werden.

Der Uhrenübergang zwischen den in Bild A2 mit E_2 und E_1 bezeichneten Zuständen soll nachgewiesen werden. In der Vakuumkammer einer Atomuhr werden Caesiumatome verdampft, und es wird ein Atomstrahl erzeugt. In diesem kommen zunächst die beiden Zustände gleich häufig vor. Der Magnet (Polarisator) lenkt die Atome so ab, dass nur Atome im Zustand E_2 in den U-förmigen Ramsey-Resonator (s. u.) gelangen. Hier werden die Atome durch Bestrahlung mit einem Mikrowellenfeld der Frequenz f_p in den anderen Zustand E_1 angeregt. Durch den zweiten Magneten (Analysator) werden dann nur die Atome, die eine Zustandsänderung von E_2 nach E_1 erfahren haben, auf den Auffänger gelenkt. Die Anzahl der Atome im Auffänger ist am größten, wenn f_p den für das Caesium-Atom charakteristischen Wert f_{Cs} hat.

Wird die Anregungsfrequenz um die Frequenz des Uhrenübergangs herum variiert, so registriert man eine Resonanzlinie, die in der Abbildung links unten skizziert ist. Ihre spektrale Breite hängt wegen der Abwesenheit von spontanen Übergängen nur von der Dauer der Wechselwirkung mit dem Hochfrequenzfeld ab. Zusätzlich müssen dafür die technischen Voraussetzungen erfüllt sein, dass das statische Feld „C“ über die gesamte Ausdehnung hinreichend homogen und die Phase des anregenden Feldes hinreichend konstant ist. Letzteres ist bei einer Wellenlänge von ca. 3 cm nur über einen sehr kleinen Bereich zu erreichen. Daher fruchtet Norman Ramseys Idee: Das Hochfrequenzfeld wird in einem zweiarmigen Mikrowellenresonator geführt. Die Atome (Geschwindigkeit v) werden dann durch eine Bestrahlung über die Länge von ca. 2 cm im ersten Arm des Resonators in einen kohärenten Superpositionszustand gebracht und nach der freien Driftstrecke der Länge L im zweiten

