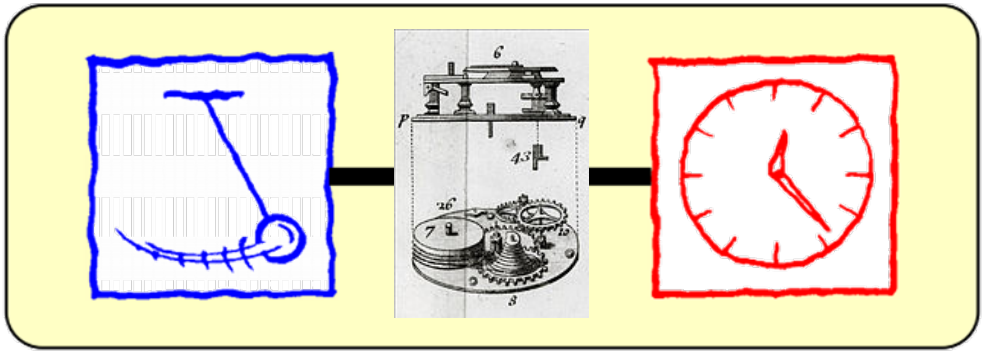
Wie funktioniert eine Atomuhr?

Was ist eine Uhr

Uhren – Messgeräte der Zeit – gehören zu den genauesten Messgeräten überhaupt und werden für viele Anwendungen in Technik und Forschung eingesetzt.

Das Prinzip einer Uhr:



Pendel + Uhrwerk + Anzeige

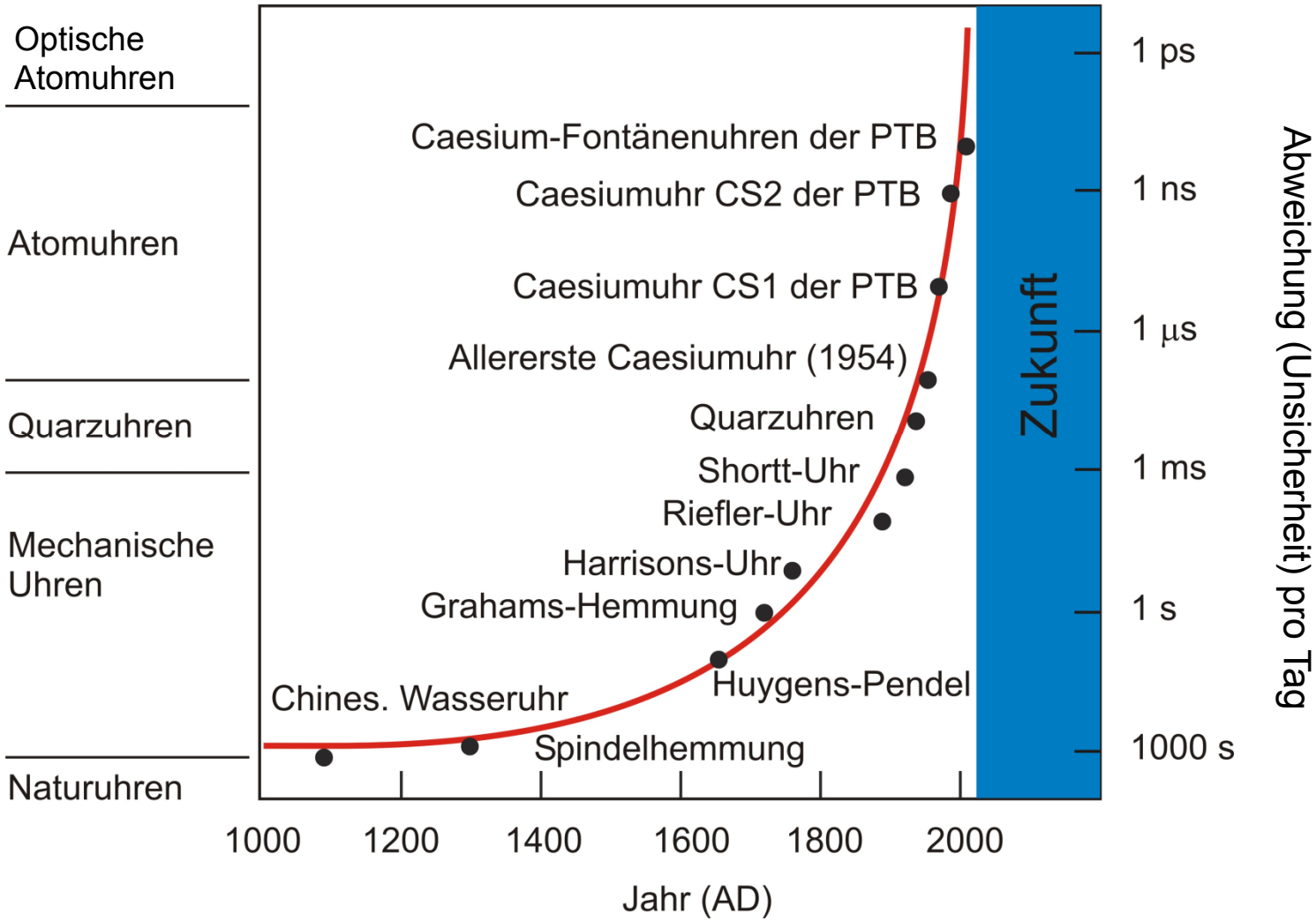
Genauigkeit:

Abweichung der Anzeige einer Uhr von einer „idealen“ Uhr

Beispiel: 1 s Abweichung pro Tag ergibt (1 s/86400 s) ≈ $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ relative Abweichung

Uhrwerk Zeichnung: Quelle: Wikipedia commons

Entwicklung der Genauigkeit von Uhren



Huygens, Graham, Harrison, Riefler, Shortt haben zur Weiterentwicklung von mechanischen Uhren beigetragen.

Entwicklung der Genauigkeit von Uhren

Zusammenfassung zu dem vorherigen Bild:

- **Naturuhren:** kein Taktgeber (z. B. Kerzenuhr, Sanduhr, Wasseruhren) oder Rotationsfrequenz der Erde (bei Sonnenuhren 1 Umdrehung/Tag),
- **Mechanische Uhren:** Taktgeber: Pendel; Schwingungsfrequenz ca. 1 Hertz (1 Schwingung/Sekunde), relative Abweichung ca. 10^{-6} bis $3 \cdot 10^{-8}$,
- **Quarzuhren:** Taktgeber: Elektronischer Quarzoszillator; Schwingungsfrequenz bis Megahertz (10^6 Hz), relative Abweichung ca. 10^{-6} bis 10^{-9},
- **Atomuhren:** Taktgeber: Strahlungsübergänge im Mikrowellenbereich; Schwingungsfrequenz im Gigahertzbereich (10^9 Hz), relative Abweichung $< 10^{-15}$,
- **Optische Atomuhren:** Taktgeber: Optische Strahlungsübergänge; Schwingungsfrequenz im Petahertzbereich (10^{15} Hz), relative Abweichung $< 10^{-17}$ erreicht.

1. **Die Genauigkeit der Uhren steigt mit der Frequenz des „Pendels“ an**
2. **Atomuhren sind die besten Uhren.**
3. **Die Zeiteinheit Sekunde wird über atomare Übergänge definiert.**

Definition der 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.“

Quelle: BIPM (Bureau International des Poids et Mesures): Internationales Büro für Maß und Gewicht, 1967.

Der Zahlenwert wurde so gewählt, dass die Sekunde in dieser Definition übereinstimmte mit der Dauer der „Ephemeridensekunde“, die bis zum Übergang auf die atomar definierte Sekunde im Jahr 1967 die Zeiteinheit im Internationalen Einheitensystem war.

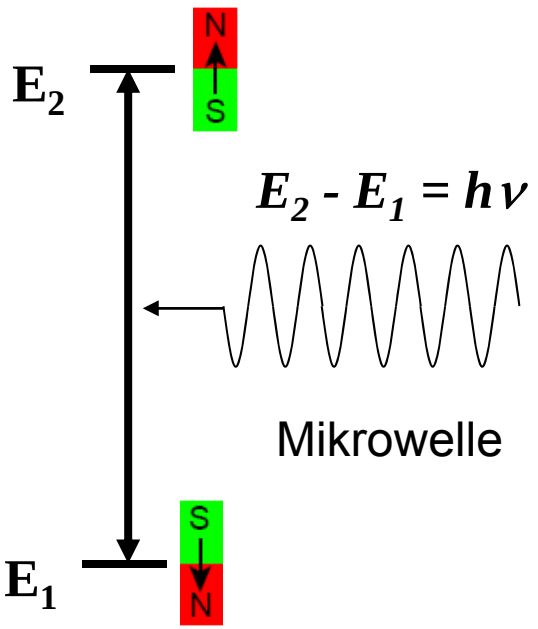
Eine Ephemeridensekunde ist der 1/31 556 925,9747-ste Teil des tropischen Jahres am 0. Januar 1900 um 12 Uhr Ephemeridenzeit. Eine Ephemeridensekunde hat in den1950er-Jahren die „Sonnensekunde“ abgelöst – den 1/86400-sten Teil eines mittleren Sonnentages.

Übergänge in Atomen als „Pendel“: Caesium

Der Grundzustand des Cs-Atoms existiert in zwei stabilen energetischen Unterzuständen E_1 und E_2.
In den beiden Zuständen hat das Atom unterschiedliche magnetische Momente (symbolisiert durch die Magnete auf der Abbildung). Das Atom kann die Energiedifferenz E_2 - E_1 absorbieren und dadurch seinen energetischen und gleichzeitig seinen magnetischen Zustand ändern. Dies passiert, wenn die eingestrahlte Mikrowellen-frequenz 9 192 631 770 Schwingungen in der Sekunde beträgt:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

h = 6,626 ·10^{-34} Js, Plancksche Konstante.

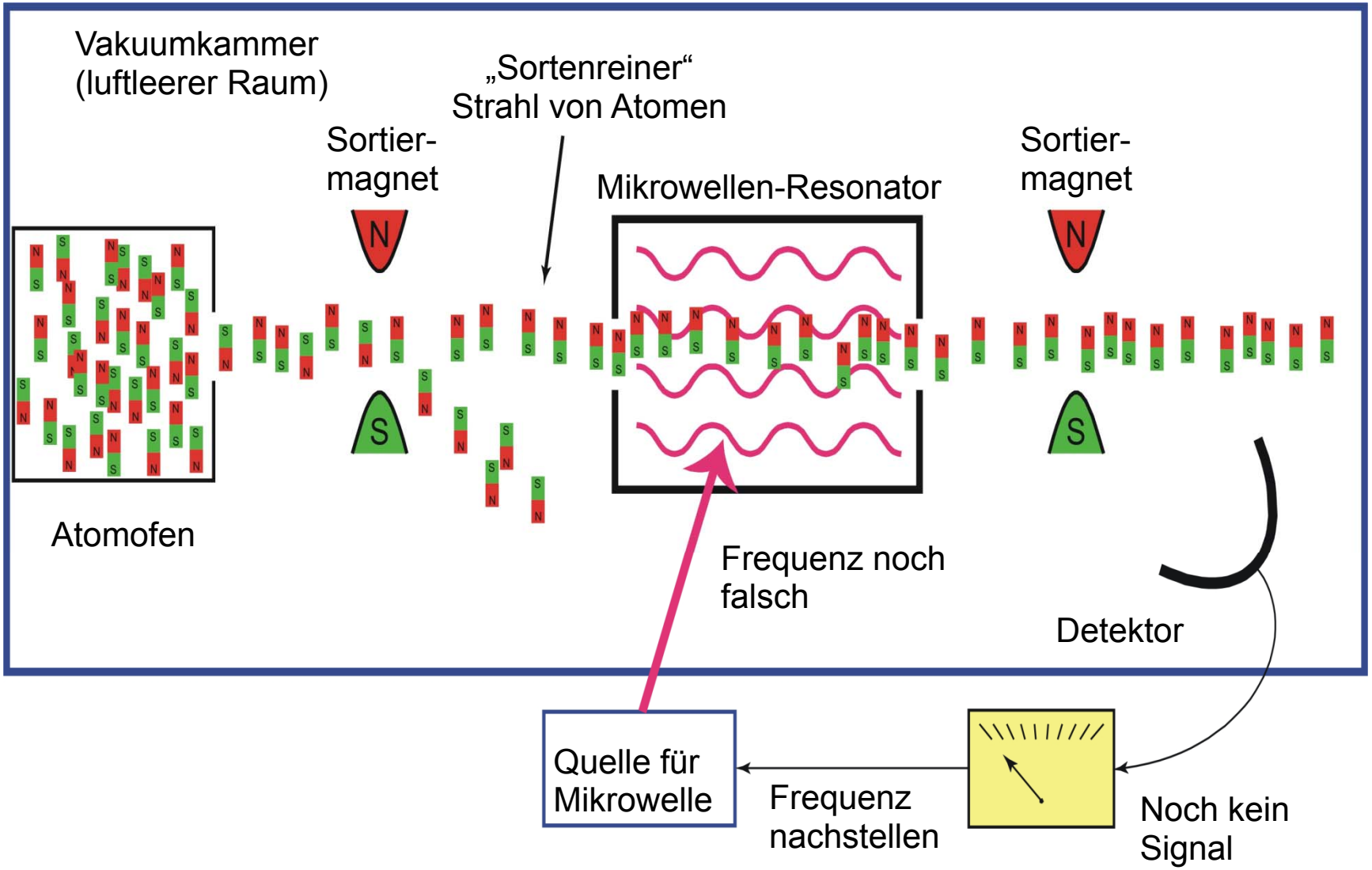


Caesium-Atom als „Pendel“ für Atomuhr

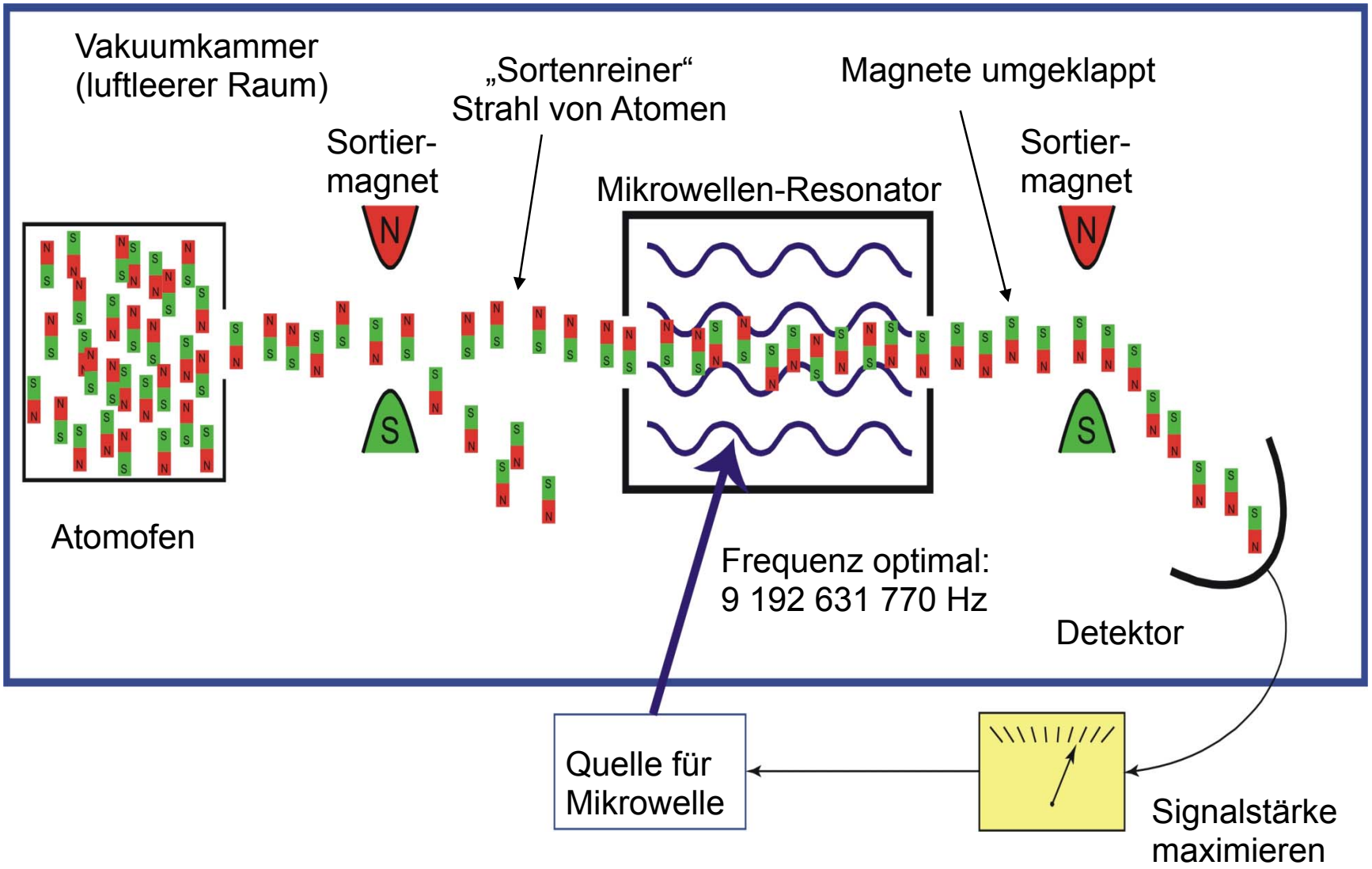
Aus mehreren physikalischen Gründen eignet sich das Cs-Atom sehr gut für die Realisierung einer Atomuhr:

- der Übergang zwischen den beiden Cs-Grundzuständen erfolgt bei der Absorption der Energie im Mikrowellenbereich (Frequenz ca. 9,2 GHz); zur Zeit der Entwicklung der ersten Atomuhren war die Technologie für diesen Frequenzbereich bereits vorhanden,
- der Übergang hat eine sehr kleine natürliche Linienbreite: die Übergangs-frequenz ist gut definiert,
- Cs hat nur ein natürliches Isotop, ^{133}Cs: es gibt gut definierte physikalische Zustände, alle Atome im Atomstrahl haben exakt die gleichen Eigenschaften,
- Cs hat eine niedrige Verdampfungstemperatur: es lassen sich im Vakuum leicht Atomstrahlen mit vielen Cs-Atomen erzeugen,
- Cs hat eine relative große Masse: bei vorgegebener Temperatur eines Atomstrahl ist das Atom langsam: die Wechselwirkungszeit mit dem elektromagnetischen Feld ist lang (siehe Wechselwirkungsverbreiterung, S.12).

Aufbau einer Atomuhr mit Caesium-Atomstrahl



Aufbau einer Atomuhr mit Caesium-Atomstrahl



Die Frequenz, bei der die Caesium-Atome von einem Zustand in den anderen übergehen (Magnete werden „umgeklappt“), beträgt 9 192 631 770 Hz.

Aufbau einer Atomuhr mit Caesium-Atomstrahl

In einer Caesium- Atomuhr wird die Zeiteinheit ihrer Definition entsprechend realisiert. Beschreibung zu den vorherigen zwei Abbildungen:

- Alle Prozesse finden in einer Vakuumkammer statt.
- Caesium wird in einem Ofen auf eine Temperatur von ca. 100°C erhitzt. Mit den verdampften Atomen wird ein Atomstrahl erzeugt. Cs-Atome befinden sich in etwa gleicher Anzahl in den beiden energetisch tiefsten Zuständen, die sie einnehmen können.
- Nach dem Verdampfen werden die Atome in einem inhomogenen Feld eines „Sortiermagneten“ magnetisch sortiert, so dass nur Atome in einem Zustand (eine Sorte) in den Mikrowellen-Resonator gelangen.
- Dort werden die Atome mit einem Mikrowellenfeld bestrahlt. Solange die Frequenz von 9 192 631 770 Hz verschieden ist, passiert nichts. Wird dagegen diese Frequenz genau getroffen, wird die Mikrowellenenergie durch die Cs-Atome absorbiert. Der magnetische Zustand der Atome ändert sich.
- Nach Verlassen des Resonators sortiert ein zweiter Sortiermagnet die Atome. Diejenigen, die ihren Zustand gewechselt haben, werden mit einem speziellen Detektor aufgefangen.
- Die Frequenz des Mikrowellenfeldes, bei welcher die aufgefangene Zahl der Atome am größten ist, wird festgehalten und elektronisch gezählt.
- Nach 9 192 631 770 Periodendauern dieser Mikrowellenstrahlung ist eine Sekunde verstrichen.

Die Caesium-Uhr CS2 an der PTB

CS2 ist in Betrieb seit 1985, seit 1991 liefert sie die Sekunde der gesetzlichen Zeit in Deutschland. Auf dem Foto: hinten – Vakuumkammer, vorne – Regelungselektronik. Standort: PTB Braunschweig; relative Abweichung 10^{-14}, das entspricht ca. 1 Sekunde in 3 Millionen Jahren.
Kommerzielle Atomuhren mit geringeren Genauigkeiten sind ähnlich aufgebaut.

Wechselwirkungsverbreiterung und Stabilität

Der Übergang in Cs hat eine sehr kleine natürliche Linienbreite.

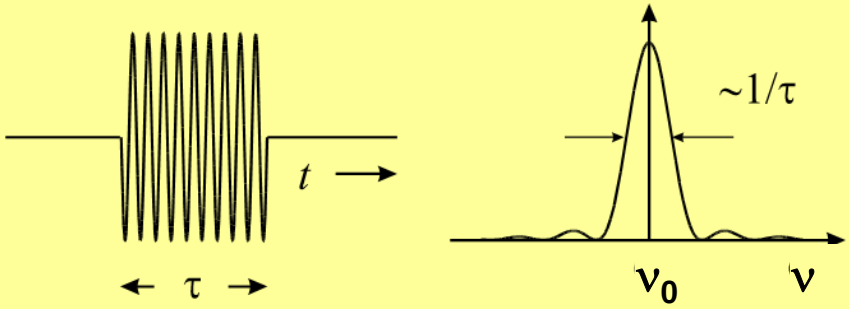
Durch die begrenzte Wechselwirkungszeit τ der Caesiumatome mit dem Mikrowellenstrahlungsfeld wird die gemessene Linie in der Atomuhr verbreitert.

Damit wird die auf das Linienzentrum geregelte Frequenz weniger genau und weniger stabil.

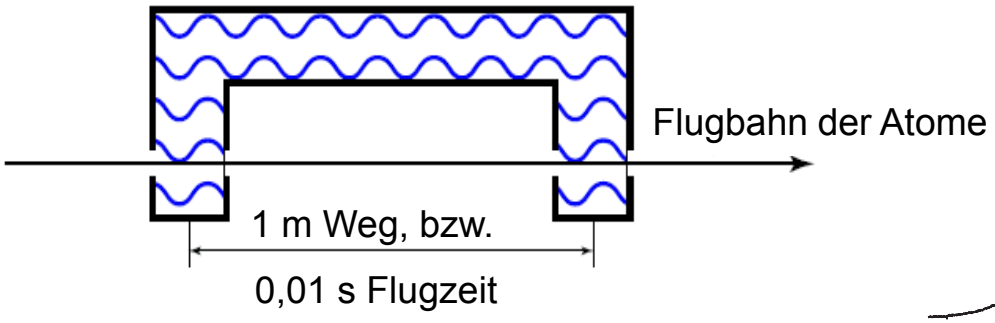
Verbreiterung: $\Delta\nu \sim 1/\tau$

d.h. längere Wechselwirkungszeit τ führt zu besserer Stabilität

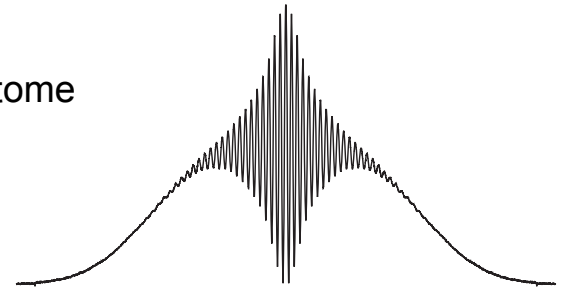
Wechselwirkungszeit τ



Ramsey-Anregung: ein technischer Trick



Ramsey–Resonator



Ramsey – Resonanz

Norman Ramsey

Zur Verringerung der Wechselwirkungsverbreiterung sollen die Cs-Atome auf ihrem Flug möglichst lange mit einem Mikrowellenfeld mit konstanter, stabiler Frequenz bestrahlt werden.

Norman Ramsey (geb. 1915, US Physiker, Nobelpreisträger 1989) hat gezeigt, dass es zur Erzielung kleiner Linienbreiten am günstigsten ist, wenn die Cs-Atome zweimal hintereinander (zu Beginn und am Ende der Wechselwirkungszeit mit dem Mikrowellenfeld) mit relativ großem zeitlichen Abstand T bestrahlt werden. In großen Atomstrahluhren wird $T \approx 0{,}01$ s erreicht, man erreicht damit Linienbreiten $1/(2T)$ von 50 -100 Hz.

Diese „Ramsey-Anregung“ wird heutzutage praktisch in allen Atomuhren benutzt.

Neue Generation – die Caesium-Fontänenuhren

(1) Mithilfe von speziell ausgerichteten Laserstrahlen werden die Caesiumatome (ca. 200 000) in einer kleinen Wolke eingefangen und auf eine Temperatur von nur 1/1 000 000 K über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt.

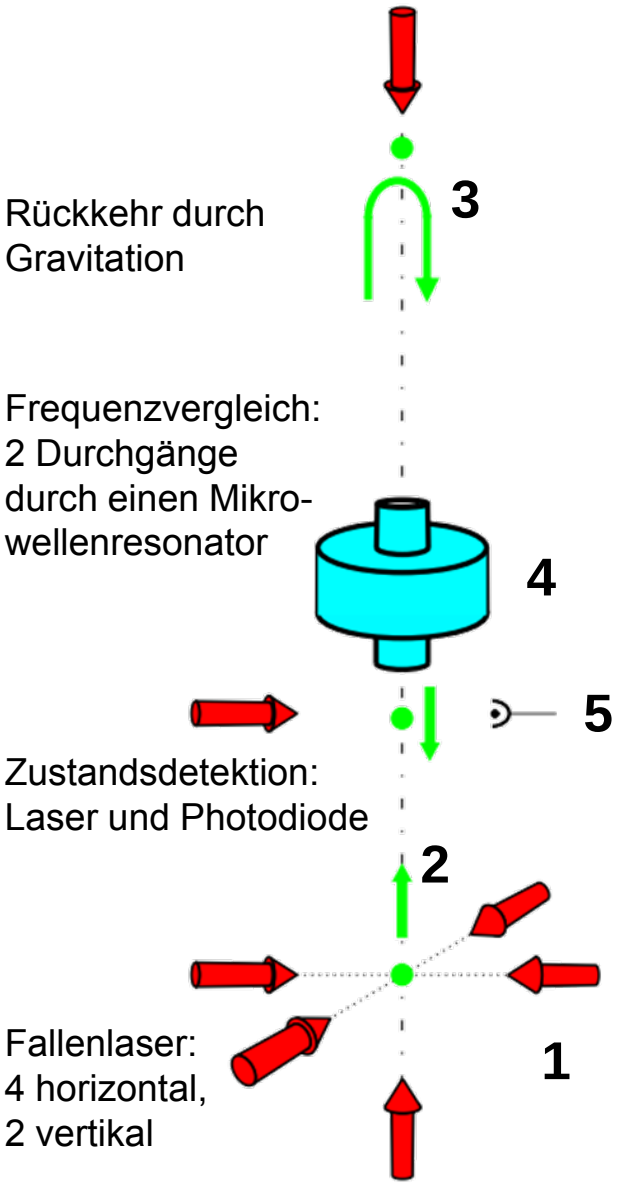
(2), (3) Danach wird die Atomwolke durch Laserstrahlen beschleunigt, etwa einen Meter hoch nach oben geworfen, bevor sie unter dem Einfluss der Gravitation wieder herunterfällt (wie in einer Fontäne).

(4) Die Wechselwirkung mit dem Mikrowellenfeld in einem Mikrowellenresonator auf dem Weg nach oben und unten stellt eine Ramsey-Anregung dar.

(5) Die angeregten Atome werden detektiert.

Die Zeit zwischen den beiden Wechselwirkungen beträgt jetzt $T \approx 0{,}5$ s (statt 0,01 s im Atomstrahl in Cs-Atomstrahluhr).

Die relative Abweichung von Fontänenuhren ist besser als 10^{-15}.

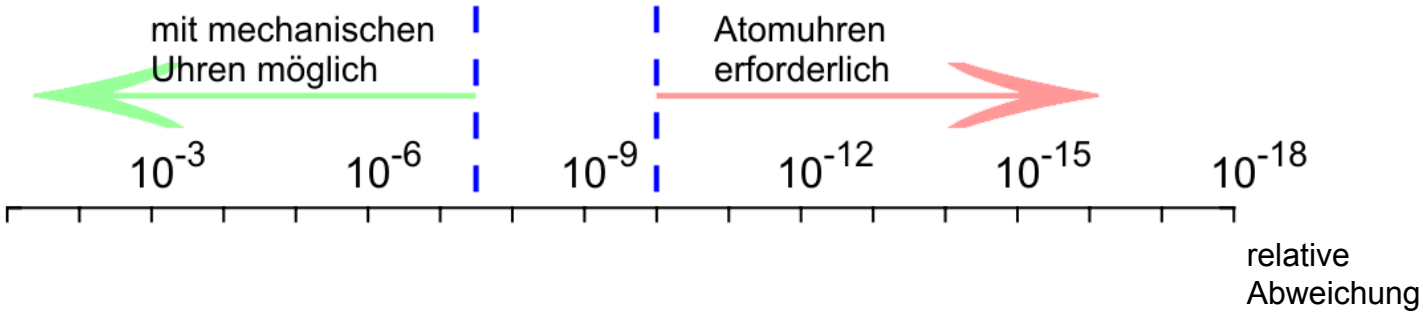


Die Caesium-Fontänenuhren der PTB

Deutschlands beste Atomuhren: CSF1 und CSF2 (CS für Caesium, F für Fontäne), im Betrieb seit 1999 bzw. 2009.
Standort: PTB Braunschweig

Relative Abweichung < 10^{-15}: das entspricht ca. 1 Sekunde in 30 Millionen Jahren oder ca. 300 Sekunden seit Beginn des Universums.

Wer braucht genaue Uhren?



allgemeine Zeitkoordination

Frequenzsynchronisation des Stromnetzes:

etwa 10^{-9} relative Unsicherheit, ein 50 Hz - Zyklus pro Jahr

Kommunikation: z. B. Moderner Mobilfunk: 3,84 MHz Signalfrequenz (UMTS) stabil auf einen Puls über 24 Stunden: $3 \cdot 10^{-12}$

Ortsbestimmung: z. B. Satellitennavigation (GPS, Galileo): 10 ns Zeitdifferenz entsprechen etwa 3 m Ortsfehler.
Beim „Nachstellen“ der Uhren alle 24 Stunden: 10^{-14}

Kontrolle anderer Uhren, hochauflösende Radioteleskope (VLBI), Grundlagenforschung: z. B. Überprüfung der Naturgesetze (Konstanz der Naturkonstanten)

Weiterführende Literatur

Mehr Informationen unter: www.ptb.de

- Themenrundgänge: “Fragen zur Zeit” sowie Abteilung Optik, Fachbereich 4.4 “Zeit und Frequenz”

  http://www.ptb.de/zeit

  http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-441/realisierung-der-si-sekunde.html
- maßstäbe, Magazin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Heft 3, Feb. 2003 “Kennen Sie schon die Zeit”: kostenlose pdf-Version unter http://www.ptb.de/massstaebe/heft_3/massstaebe_03_04.pdf

  Heft 6: Sept. 2005, “Zeitgeschichten”: http://www.ptb.de/de/publikationen/_massstaebe.html

Andere Quellen:

- E. O. Göbel und F. Riehle: Zeitmessung – Die technische Bedeutung der genauesten Uhren, PTB-Mitteilungen **114** (2004), Heft 4
- N. F. Ramsey, Nobel Lecture: Experiments with Separated Oscillatory Fields and Hydrogen Masers, pdf - Version unter: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/ramsey-lecture.html
- F. Riehle: Frequency Standards: Basic and Applications, Wiley-VCH, Weinheim (2004), ISBN 3-527-40230-6, für “Introduction” siehe “Blick ins Buch” unter: http://www.amazon.de/gp/product/3527402306
- http://physics.unifr.ch/pk2000/index.html - eine didaktische Seite über Physik (u. a. Quantenatom, Übergänge in Atomen, Laser, Mikrowellen...)

Kontakt

Foto: Wächtergruppe von Friedrich-Wilhelm Voswinkel (1982) am Eingang der PTB, Braunschweig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
http://www.ptb.de

Abteilung 4 - Optik,
Sekretariat: Tel.: (05 31) 592-40 11
E-Mail: Abteilung4@ptb.de