

**Die Atomsekunde -
Das Ende der mech. Räderuhr als Zeitstandard**

Schon immer beschäftigt das Phänomen „Zeit“ die Menschheit; insbesondere Philosophen setzen sich mit dem „Ewigen Rätsel“ auseinander:

Was also ist Zeit?

Wenn mich niemand darüber fragt,

so weiss ich es;

wenn ich es aber jemanden erklären möchte,

so weiss ich es nicht !

(Aurelius Augustinus)

Zeit ist, was verhindert, dass alles auf einmal passiert !

(John A. Wheelers)

Warum es überhaupt Zeit gibt, verrät uns auch die beste Uhr nicht, denn sie

> zeigt nur, dass Zeit da ist und → sie vergeht

Physikalisch gesehen ist Zeit einfach nur eine > unabhängig variable Grösse !

Seit 1970 ist in Deutschland das Internationale Einheitensystem SI vorgeschrieben:

> Gesetz über Einheiten im Meßwesen

Die >> Basiseinheiten << (alles andere sind hiervon abgeleitete Größen) lauten:

- > Länge → Meter [m]
- > Lichtstärke → Candela [cd]
- > Masse → Kilogramm [kg]
- > Stoffmenge → Mol [mol]
- > Stromstärke → Ampere [A]
- > Temperatur → Kelvin [K]
- > Zeit → Sekunde [s]

Laut dem o.g. Einheitengesetz ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig verpflichtet, deren jeweilige > Prototype < bzw. > Normale < zu bewahren und weiterzugeben.

Die Behörde

Die PTB ist das nationale Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland mit
> wissenschaftlich-technischen *Dienstleistungsaufgaben* für
> Bürger, Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft.

Sie ist natur- und ingenieurwissenschaftliches Staatsinstitut und die technische Oberbehörde für das Messwesen Die PTB gehört zum → Dienstbereich des
>>> Bundesministeriums für Wirtschaft <<<

Zur Zeit

Die PTB ist durch das Zeitgesetz von 1978 (1994) damit beauftragt → die für das
> öffentliche Leben < in der Bundesrepublik maßgebende Uhrzeit anzugeben !

Gesetz über die Zeitbestimmung

Im Zeitgesetz (ZeitG) vom 25.07.1978 in der geänderten Fassung vom 13.09.1994

- §2 → Die gesetzliche Zeit wird von der PTB dargestellt und verbreitet
- §3 → Ermächtigung zur Einführung der mitteleuropäischen Sommerzeit

Die Atomuhren der PTB (CS1 ... CS5) zählen zu den → genauesten der Welt !!!

Die Sekunde (lat. secunda) nach der Minute die zweite Unterteilung der Stunde

> der kleinste Zeitabschnitt, der > noch < gut zählbar und darstellbar ist

Deshalb zur physikalisch - technischen Grundeinheit (Basiseinheit SI) bestimmt

> Tag		86 400 sec
> Stunde		3 600 sec
> Minute		60 sec
> Sekunde	0	10^0
> Millisekunde	—————▶ 0,001	—————▶ 10^{-3} sec
> Mikrosekunde	—————▶ 0,000 001	—————▶ 10^{-6} sec
> Nanosekunde	—————▶ 0,000 000 001	—————▶ 10^{-9} sec
> Picosekunde	—————▶ 0,000 000 000 001	10^{-12} sec
> Femtosekunde	-----▶	10^{-15} sec
> Attosekunde	-----▶	10^{-18} sec

Die Frequenz ist in Naturwissenschaft und Technik mit der Zeit → eng verbunden
 > Anzahl von Schwingungen pro Sekunde, in Hertz (Hz) gemessen

Bei sich regelmässig wiederholenden Vorgängen nennt man → das Zeitintervall
 > Periode und die → Wiederholrate nennt man > Frequenz

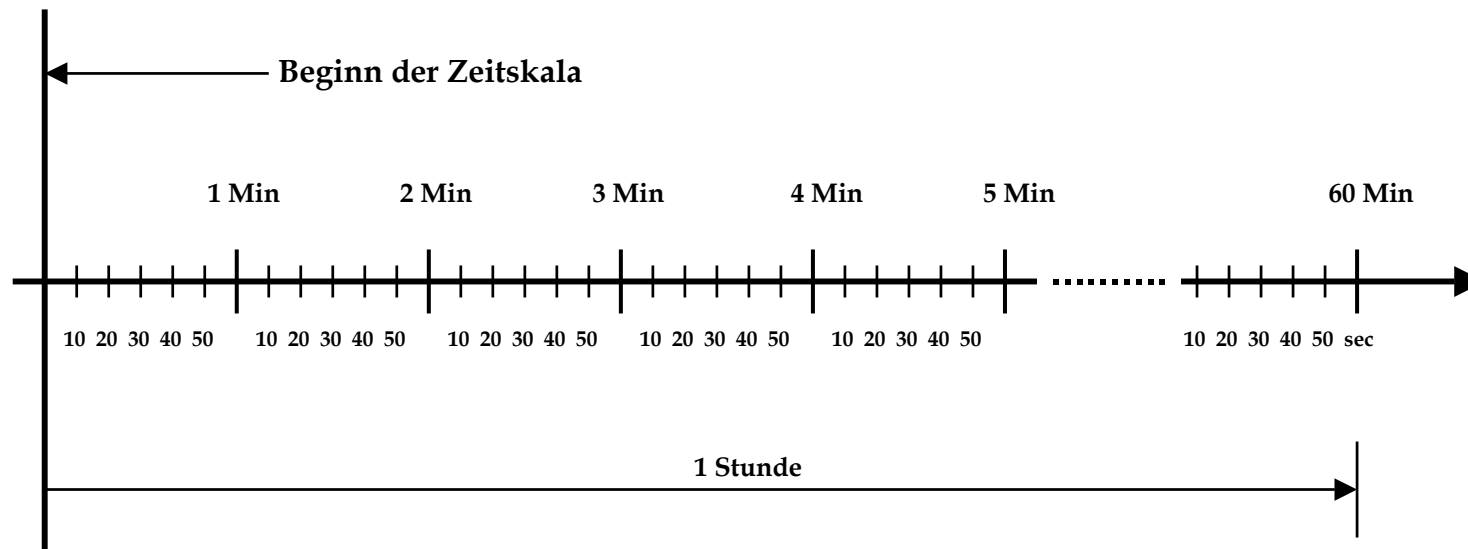
> Präzisionspendeluhr	Sekundenpendel	1/2 Hz
> Taschenuhr (typisch)	18.000) Halb-	2,5 Hz
> Armbanduhr (ETA 2824)	28.800) Schwingungen	4 Hz
> Armbanduhr (El Primero)	36.000) pro Stunde	5 Hz
> Armbanduhr (Stimmgabel)	→	300 Hz
> Quarzuhr (typisch)	→	32 768 Hz

Für eine Zeitmessung sind immer mehrere messtechnische Aufgaben zu erfüllen:

1. Messung der Dauer von Zeitintervallen
2. Registrierung der Häufigkeit von Ereignissen im vorgegebenen Zeitintervall
3. Datierung von Ereignissen in einer Zeitskala

Um eine Uhrzeit anzugeben werden (neben der → Definition der Zeiteinheit) eine Reihe von > Konventionen < über die Parameter einer → Zeitskala vorausgesetzt:

1. Zeitpunkt des Beginns einer Zeitskala (Nullpunkt)
2. Skalenmaß (Sekunde) und die
3. Bezeichnung von Vielfachen des Skalenmaßes (Minute, Stunde)



Man kennt → *Astronomische Zeitskalen* und → *Atomzeitskalen*

Im Prinzip ist → jeder periodisch gleichmässig, stetig ablaufende Vorgang als ein
> Zeitnormal verwendbar

Das > astronomische Zeitnormal < ist die Bewegung der Erde um die Sonne und
genügte Jahrtausende diesem Anspruch. Die Sekunde in früheren Tagen als der

> 86 400ste Teil des mittleren Sonnentages festgelegt und die das

tägliche Leben bestimmende Uhrzeit von der > mittleren Sonnenzeit < abgeleitet

Zwar wurde mit Reichsgesetz Nr. 7 in Deutschland zum 01. April 1893 die MEZ
eingeführt, aber keine amtliche Vorgabe der Sekunde als verbindliches Zeitmaß

Erst 1956 (!) wurde vom >>> Internationalen Komitee für Maß und Gewicht <<<
die Einheit → Sekunde (sog. Ephemeridensekunde) definiert als der Bruchteil

> $1 / 31\,556\,925,9747$ des tropischen Jahres am 01.01.1900 um 12:00 Uhr

!!!! Eine einmalige vergangene Grösse und nicht mehr reproduzierbar !!!!!

Die bisherige Zeitbetrachtung beruht auf der (scheinbaren) Sonnenbewegung
> und damit auch auf der Erdrotation

Die Erdrotation ist jedoch nicht gleichförmig, sie wird durch unterschiedliche Einflüsse (u.a. durch den Mond) >> verlangsamt und benötigt für eine ganze Umdrehung immer mehr Zeit:

>>> Extrem langsam → pro 1.000 Jahre → 5,3 sec <<<

Über längere Zeiträume summiert sich dieser Effekt zu erheblichen Zeiten !!!

> Vor ca. 370 Mio. Jahren hatte 1 Jahr rund 400 Tage (Tage wesentlich kürzer)

Der abnehmenden Rotationsgeschwindigkeit sind zusätzlich unregelmäßige

>>> Schwankungen überlagert <<<

wobei Polbewegungen Einfluss auf Breite - Erddrehungen Einfluss auf Länge

Heutzutage detailliert überwacht vom > Internationalen Erdrotationsdienst <

Der „International Earth Rotation Service“ IERS ist eine → multinationale Behörde
> gesteuert vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt/Main



Wesentliche Technologiezentren des IERS sind:

U.S. Naval Observatory



Hauptaufgaben des IERS sind die Ermittlung, Vorhersage und Dokumentation der
> Rotationsschwankungen der Erde

Die erste Quarzuhr wurde 1929 von → W. A. Morrison in New York entwickelt
> die mechanische Eigenschwingung des Quarzes sehr frequenzkonstant

In den vierziger Jahren waren bereits Genauigkeiten von 0,000 01 sec erreicht !!
Mit dieser stürmischen Entwicklung ging auch endgültig die Geschichte der

> **mechanischen Räderuhr als Präzisionsuhr zur Ende !!!**

Bereits 1932 stellten die Physiker Udo Adelsberger und Adolf Scheibe von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Braunschweig der Öffentlichkeit die

> erste deutsche Quarzuhr vor

Mit dieser Uhr haben sie 1938 nachgewiesen, dass → die bisherige Grundlage der Zeiterfassung (das astronomische Zeitnormal) > nicht völlig konstant ist <

>>> **Die Drehung der Erde wurde vom Maßstab zur Meßgröße <<<**

Die Anforderungen von Naturwissenschaft und Technik an die Meßgenauigkeit sind jedoch in den vergangenen Jahrzehnten erheblich gestiegen und damit sind

> natürliche Zeitsysteme für exakte Zeitmessungen wenig geeignet !!!

Deshalb 1967 die Sekunde über eine → atomphysikalische Konstante definiert als

Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturturniveaus des Grundzustands vom Cäsium-133-Atom entspricht.

Durch die Festlegung dieses Zahlenwertes entsprechen → 86 400 Atomsekunden
> dem uns vertrauten Zeitintervall von einem Tag (24 x 60 x 60)

Atomare Konstanten sind > zeitlich < und > örtlich < unveränderlich und lassen sich beliebig oft reproduzieren.

Alle Cäsiumatome sind gleich (ununterscheidbar) während verkörperte Normale wie z.B. Sekundenpendel → niemals zwei völlig identisch sein können !!!

Schrittmacher in der Entwicklung von → Atomuhren waren Forscherteams von:

- > NBS → National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, USA
- > NPL → National Physical Laboratory, Teddington, England

1949 wurde am NBS die erste „Molekularuhr“ gebaut, dabei > Ammoniak-Gas < in einer Elektronenröhre zu einer Eigenschwingung von 23 870,4 MHz angeregt

1951 arbeitete am NBS die erste Cäsiumuhr mit direkter Frequenzmessung

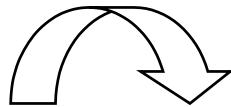
1955 arbeitete am NPL die erste Cäsiumuhr mit direkter Frequenzmessung

Weitere erfolgsversprechende Versuche bei NBS und NPL mit den → Elementen
> Cäsium, Thallium, Wasserstoff und Rubidium

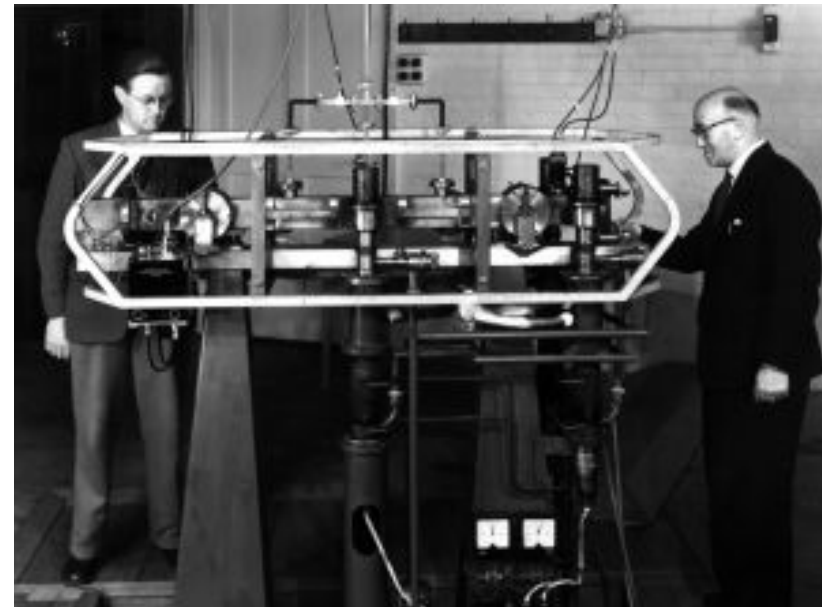
1958 in Zusammenarbeit mit dem → U.S. Naval Observatory in Washington D.C.
die erste > Atomzeitskala < basierend auf der Cäsium Hyperfeinfrequenz erstellt

Die Eigenfrequenz des Cs-Atoms in verschiedener Hinsicht als so > vorteilhaft <
dass die 13. Generalkonferenz für Maß und Gewicht am 13. Okt. 1967 eine neue
> Definition der Sekunde die >>> **Atomsekunde** <<< einführte

Die zwischen 1953 -1955 von L. Essen und J.V.L. Parry am NPL gebaute Cäsiumuhr



Cesium Atomic Clocks



Chemisches Element aus der Gruppe der Alkalimetalle mit dem Zeichen → Cs

- > Ordnungszahl 55
- > Massenzahl 133
- > Schmelzpunkt 28,5 °C
- > Siedepunkt 705 °C

Das seltene, silbrige, sehr weiche Metall findet sich nur in > gebundener Form

Im Jahr 1860 von R. Bunsen und R. Kirchhoff durch Spektralanalyse entdeckt
Im Jahr 1882 von C. Setterberg als Metall erstmalig hergestellt

> Das Cs - Isotop ist → nicht radioaktiv !!!

Für die Strahlung ist eine Umorientierung der Elektronen in → der Hülle des Atoms verantwortlich, es erfolgt → keine Änderung des Atomkerns !!!

Verwendung: Cäsium wird in der Elektrotechnik u.a. zur Herstellung von Photozellen und in der Nuklearmedizin verwendet

Seit 1988 ist das „Bureau International des Poids et Mesures“ BIPM bei Paris der
>>> Verwalter der Atomzeit <<<



Die heutige Aufgabe der Zeitbestimmung besteht im → betreiben von Atomuhren um ausgehend von einem willkürlichen Ausgangspunkt durch Aneinanderreihen

> möglichst gleich langer Sekunden eine → Atomzeitskala zu erzeugen

Die weltweite Koordination der Atomzeitskalen obliegt dem BIPM, die wirklichen

> Lieferanten der Zeit sind die nationalen Zeitinstitute

Auch das IERS, das die → astronomischen Zeitskalen verwaltet, erfüllt in diesem Szenario eine wichtige Rolle; die Astronomen werden nach wie vor gebraucht !!!

Zeitinstitute haben in der Regel mehrere Atomuhren um ihre eigenen Zeitskalen vor Unterbrechung zu schützen. Durch Zusammenfassung einer → Uhrengruppe
> wird eine stabile, zuverlässige und genauere Gruppen-Zeitskala erzeugt

Über 50 nationale Metrologieinstitute mit ca. 270 Atomuhren speisen beim BIPM ihre > Freie Atomzeit < ein, das daraus einen → gewichteten Mittelwert erzeugt

> die Freie Atomzeitskala EAL (Echelle Atomique Libre)

Die grösste Wichtung erhalten Uhren, die sich im Hinblick auf Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit → besonders qualifiziert haben. Seit Juli 1996 sind dies die:

- | | |
|---------------|-----------------------------------|
| 1. LPTF - F01 | vom BNM - LPTF, Paris, Frankreich |
| 2. NIST -7 | vom NIST, Boulder, Colorado, USA |
| 3. PTB - CS2 | von der PTB, Braunschweig |
| 4. PTB - CS1 | von der PTB, Braunschweig |
| 5. PTB - CS3 | von der PTB, Braunschweig |
| 6. CRL - 01 | vom CRL, Tokio, Japan |
| 7. NRLM - 4 | vom NRLM, Tsukuba, Japan |



Die „Temps Atomique International“ TAI ist eine **> koordinierte Atomzeitskala <** definiert in einem geozentrischen Bezugssystem mit der SI-Sekunde als Skalenmaß

> der Anfangspunkt (Nullpunkt) der TAI ist der 01. Jan.1958 um 00:00 Uhr

Sie wird vom BIPM realisiert und monatlich (im Circular T) als → Standdifferenzen zu den freien Atomzeitskalen der nationalen Institute publiziert

Die (permanent optimierte) Berechnungsmethode geht in 2 Schritten vor. Erst wird nach einem speziellen Rechenverfahren (ALGOS) zunächst die → Gang-Instabilität aller beitragenden Uhren ermittelt. Gemäss dem statistischen Gewicht erfolgt dann

> der Prozess der → Mittelung der Uhrengänge

Gemäss Relativitätstheorie sind zeitliche Vorgänge abhängig von Massenverteilung und Bewegungszustand. TAI ist deshalb auf das Gravitationspotential Meereshöhe bezogen, die Effekte der Lage der einspeisenden Uhren werden → herausgerechnet

Abweichung TAI gegenüber einer „idealen“ Uhr: +/- 0,000 000 1 sec/Jahr

- 18 -

Die Zeitskala „Universal Time Coordinated“ UTC ist identisch (gleiches Skalenmaß) mit TAI → mit Ausnahme der von Zeit zu Zeit eingefügten → Schaltsekunden. Sie ist

> die weltweit einheitliche Grundlage für die Zeitbestimmung im täglichen Leben

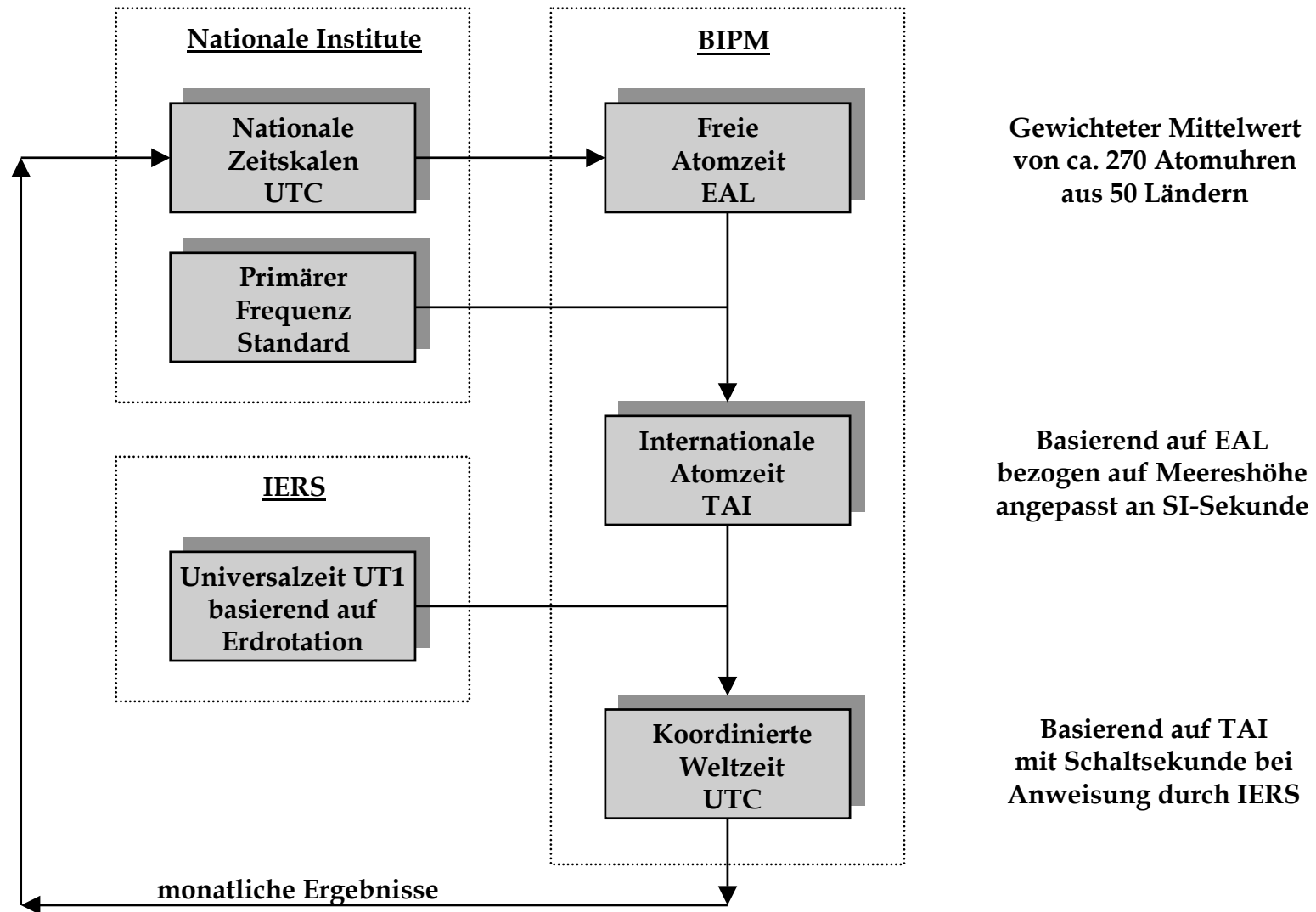
und wird mit Zeitzeichen verbreitet. Da sich unser Alltag nach dem → Sonnenstand und der → ungleichmässigen Erddrehung richtet, muss sichergestellt werden, dass UTC näherungsweise der aus >> astronomischen Beobachtungen << gewonnenen

> korrigierten Universalzeit UT1 entspricht

Entfernen sich UTC und UT1 mehr als +/- 0,9 sec → so wird auf Anweisung des IERS eine >> Schaltsekunde << eingefügt → dies erfolgt weltweit zum gleichen Zeitpunkt

Seit dem 01.Jan.1972 existiert UTC und die Differenz zu UTC-TAI wurde auf -10 sec festgesetzt. >>> Zur Zeit beträgt der Abstand -32 sec <<<

Das heisst, die Erde hat seit Jan.1958 bis zur letzten Schaltsekunde am 01.01.1999 ihre > 15 340 Umdrehungen noch nicht ganz vollendet, es fehlen ihr ca. 31,3 sec !



INTERNATIONAL EARTH ROTATION SERVICE (IERS)
SERVICE INTERNATIONAL DE LA ROTATION TERRESTRE
SERVICE DE LA ROTATION TERRESTRE
OBSERVATOIRE DE PARIS
61, Av. de l'Observatoire 75014 PARIS (France)
Tel. : 33 (0) 1 40 51 22 26
FAX : 33 (0) 1 40 51 22 91
Internet : iers@obspm.fr
Paris, 08. July 2002
Bulletin C 24

To authorities responsible for the measurement and distribution of time

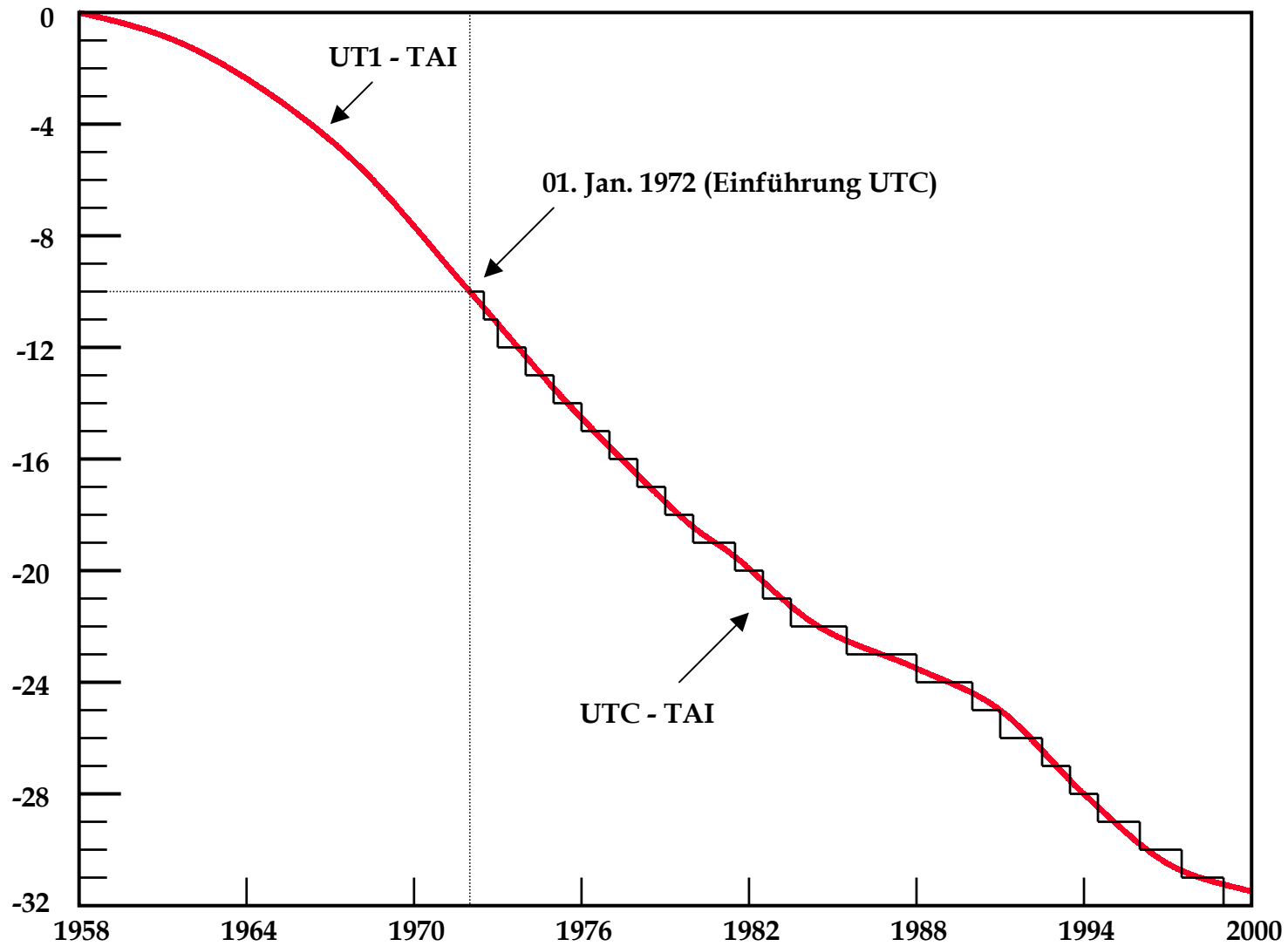
INFORMATION on UTC - TAI

NO positive leap second will be introduced at the end of December 2002. The difference between UTC and the International Atomic Time TAI is :

from 1999 January 1, 0h UTC, until further notice : $UTC-TAI = -32 \text{ s}$

Leap seconds can be introduced in UTC at the end of the months of December or June, depending on the evolution of UT1-TAI. Bulletin C is mailed every six months, either to announce a time step in UTC, or to confirm that there will be no time step at the next possible date.

Daniel GAMBIS
Director
Earth Orientation Center of IERS



Im wesentlichen haben sich Cäsium- und Rubidiumatomuhren durchgesetzt, sie
> funktionieren ähnlich wie ihre klassischen Vorgänger:
Sie messen Zeit durch das Zählen von → periodischen Schwingungen, damit ist
> ein → Zeitstandard gleichbedeutend einem → Frequenzstandard

Atome kommen in verschiedenen Energie-Zuständen (Niveaus) vor, von denen
> zwei mit E_2 und E_1 (Hyperfeinstruktur-niveaus) gekennzeichnet sind
Der Übergang eines Atoms von einem Zustand in den anderen Zustand ist mit
der Aussendung bzw. der Absorption → elektromagnetischer Strahlung einer
> charakteristischen Frequenz f_0 verbunden:

Im Falle von Cäsium: —————→ 9 192 631 770 Hz

Im Falle von Rubidium: —————→ 6 384 682 613 Hz

Nach den → Gesetzen der Atomphysik ergibt sich f_0 aus der Energiedifferenz
zwischen den beiden Zuständen E_2 und E_1 . Insbesondere beim → Cäsium-Atom

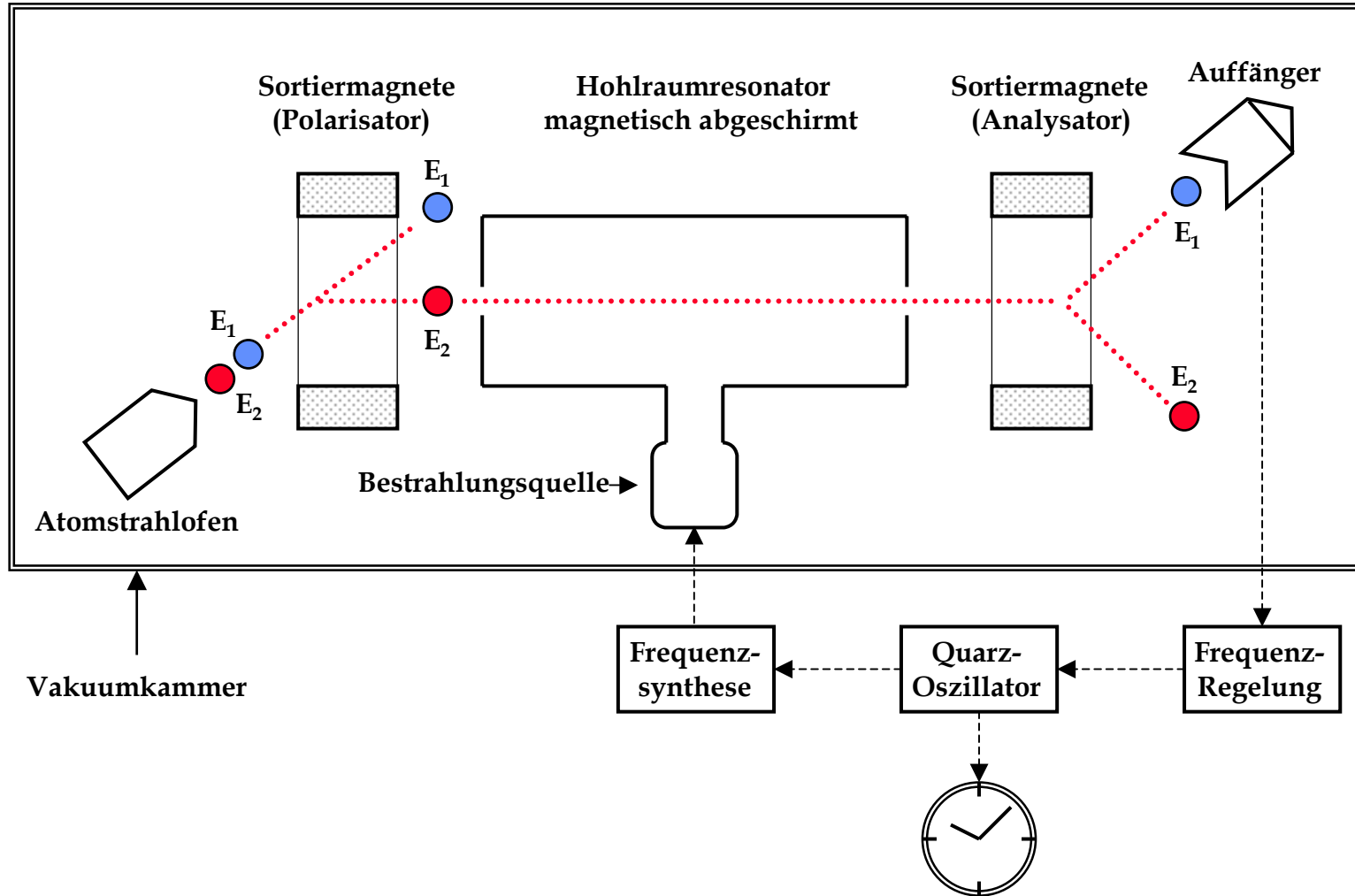
> ist f_0 weitaus besser > zeitlich konstant < als

die Schwingungsdauer eines Pendels oder die Schwingfrequenz eines Quarzes !!

- 23 -

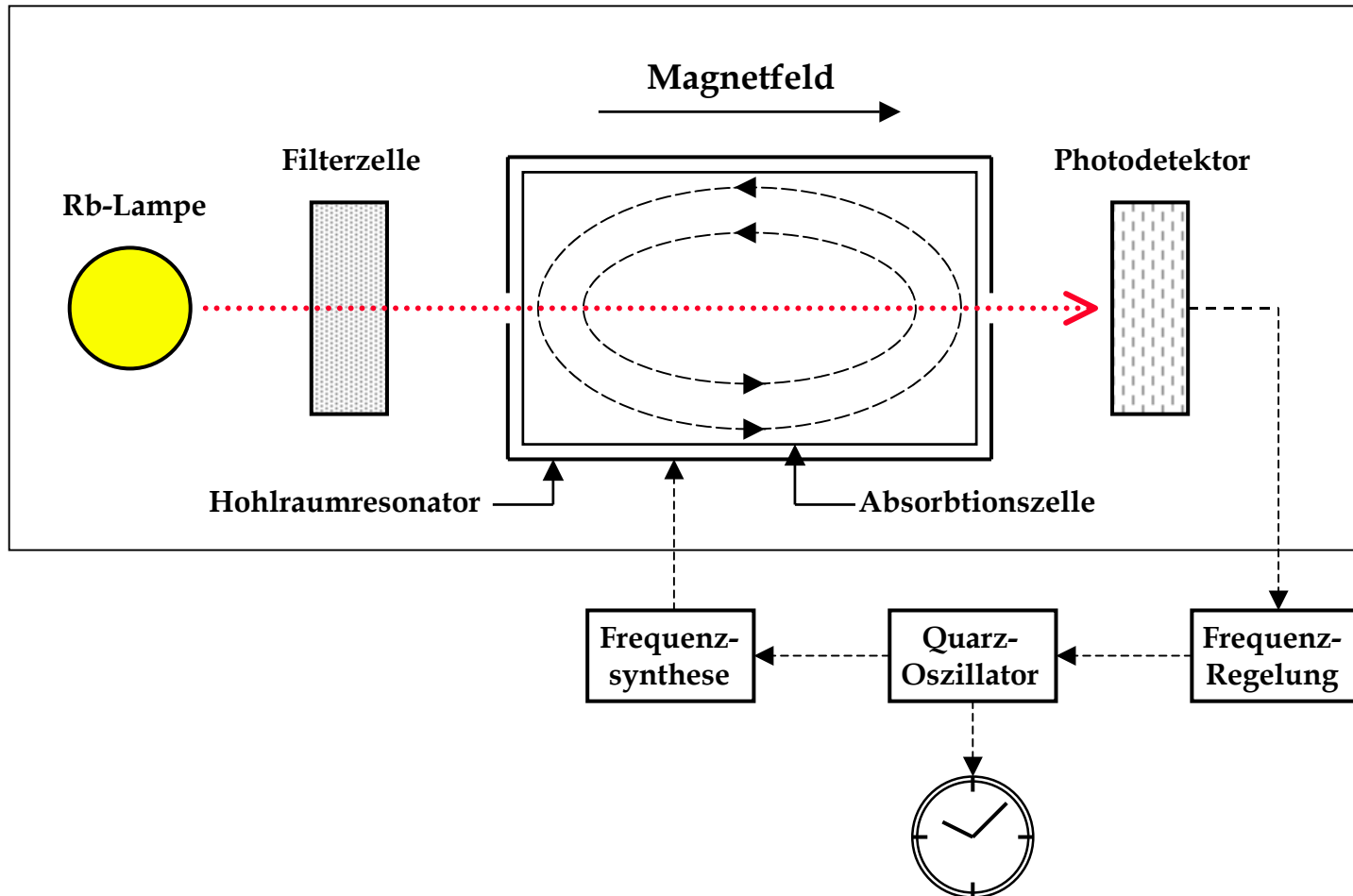
- > In der Vakuumkammer der Uhr werden in einem Ofen Cäsium-Atome verdampft
- > Der Cs-Atomstrahl passiert einen Sortiermagneten (Polarisator) der nur E_2 Atome in die → gewünschte Richtung ablenkt
- > Im Hohlraumresonator werden die E_2 Atome mit einem magnet. Mikrowellenfeld bestrahlt, im → Resonanzfall gehen die Atome in den Zustand E_1 über
- > Der Sortiermagnet (Analysator) lenkt nun die Atome, die eine Zustandsänderung erfahren haben, auf einen → Auffänger (Ionisationsdetektor)
- > Die Anzahl der Atome im Auffänger ist am → grössten, wenn die → Frequenz des Mikrowellenfeldes dem charakteristischen Wert von f_0 des Cäsiums entspricht
- > Eine elektronische Regelung sorgt dafür, dass der Mikrowellen-Oszillator auf → f_0 gehalten wird. Durch Frequenzteilung wird die > 1-Hz-Impulsfolge < gewonnen

Da seit 1967 die Zeiteinheit mit der Cäsiumuhr erzeugt wird, hat diese Technologie >>> eine herausragende Bedeutung <<<



Im sog. Rubidiumdampf-Frequenznormal erfolgt der → Nachweis des Übergangs zwischen den → Hyperfeinstrukturniveaus mit einem >> optischen Verfahren <<

- > Licht aus einer → Rb-Lampe läuft durch eine mit Rb-Dampf gefüllte → Filterzelle in einen → Hohlraumresonator und regt dort Rb-Atome in einer mit → Puffergas (Mischung leichter Edelgase) gefüllten → Absorbtionszelle an
- > Durch sog. „Optisches Pumpen“ wird selektiv das untere Niveau der Hyperfeinstruktur der Rb-Atome → entvölkert, so dass die Atome nach einiger Zeit in der Zelle → kein Licht mehr absorbieren können
- > Sobald die → Mikrowellenstrahlung auf die Atome einwirkt, wird das untere Niveau wieder besetzt und die Absorption tritt erneut auf
- > Im → Resonanzfall wird im Photodetektor dann ein → Minimum beobachtet
- > Eine elektronische Regelung sorgt dafür, dass der Mikrowellen-Oszillator auf → f_0 gehalten wird. Durch Frequenzteilung wird die > 1-Hz-Impulsfolge < gewonnen



Die Cäsiumuhr

- ☺ ☺ > Hochstabiles und absolut zuverlässiges System
- ☺ > Nahe dem Ideal der freien, ungestörten Atome
- ☹ > Hergestellte Stückzahl: ca. mehrere 100 pro Jahr
- ☹ > Hoher Preis: Euro 40.000 ... 100.000
- ☹ > Großvolumig

Die Rubidiumuhr

- ☺ ☺ > Geringe Instabilität bei kurzen Messzeiten
- ☺ > Kompakte Abmessungen
- ☺ > Günstiger Preis: Euro 2.000 ... 10.000
- ☹ > Hergestellte Stückzahl: ca. mehrere 1.000 pro Jahr
- ☹ ☹ > Begrenzte langzeitige Frequenzinstabilität (*)

(*) Hauptsächlich bedingt durch Alterung: Strahlungsintensität der Rb-Lampe sowie Zusammensetzung des Gases in Filterzelle und Absorbtionszelle

Stand

Differenz zwischen Anzeige der Uhr und einer Referenzuhr [sec]

Gang (auch relative Frequenzdifferenz genannt)

Differenz zweier Stände der Uhr dividiert durch Zeitintervall [sec / Tag]

Gangunsicherheit

Frequenzabweichung des Schwingsystems der Uhr von der Normalzeit;
bzw. bei Atomuhren die Übereinstimmung der mit der Uhr realisierten
Sekundendauer mit der in der → Sekundendefinition festgelegten Dauer

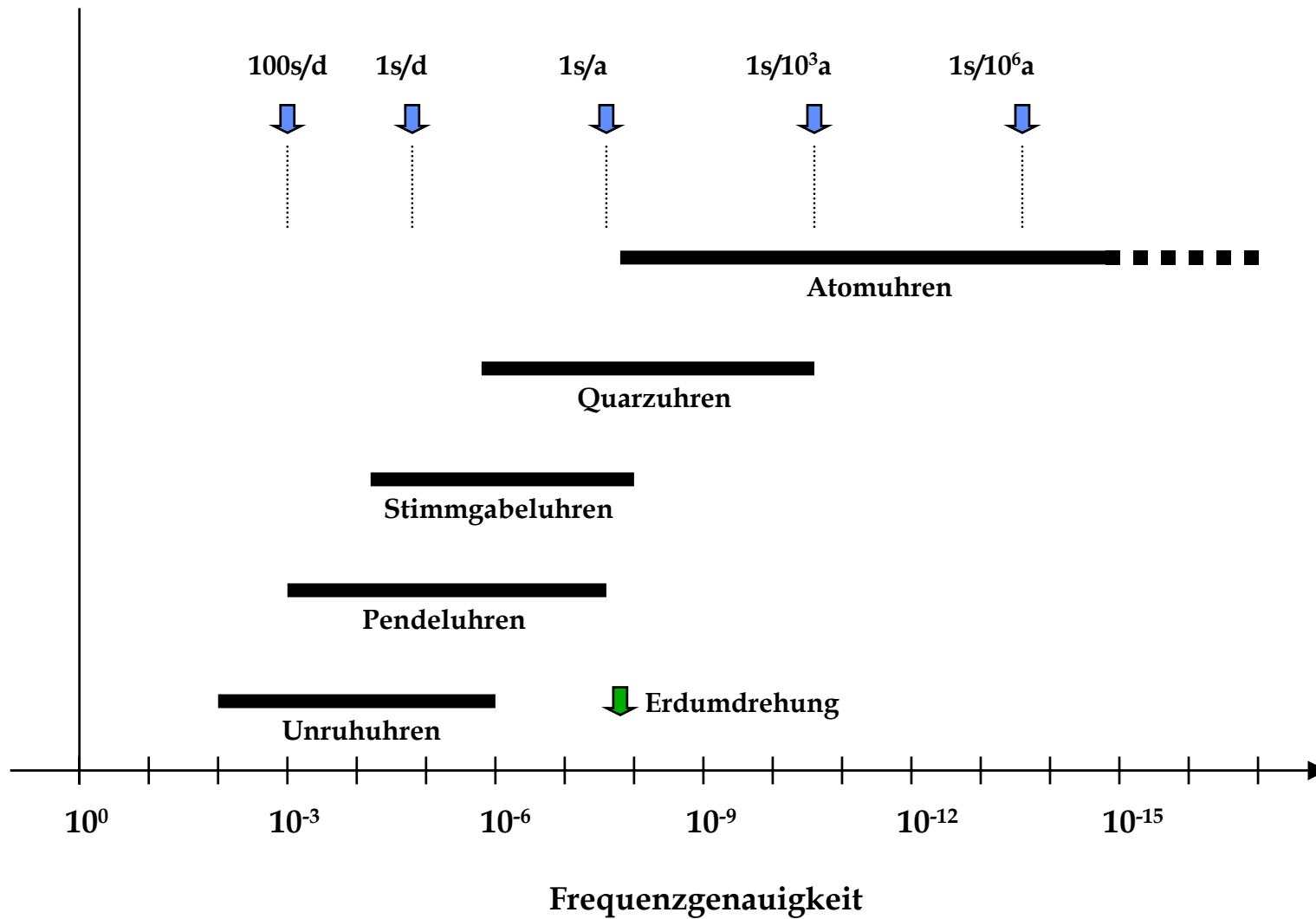
Beispiele:

Bei einem Gang von 2 s/d ergibt sich bei einem Armbandchronometer:

$$\Delta t = 2 \text{ s/d} > 2 \text{ s} : 86400 \text{ s} > 0,000\ 023\ 2 > 2,32 \times 10^{-5}$$

Bei einem Gang von 0,05 s/d ergibt sich für eine Präzisionspendeluhr:

$$\Delta t = 0,05 \text{ s/d} > 0,05 \text{ s} : 86400 \text{ s} > 0,000\ 000\ 578 > 5,78 \times 10^{-7}$$



Primäre Atomuhren unterscheiden sich von → kommerziellen Cs-Uhren dadurch, dass ihre frequenzbestimmenden Parameter außerordentlich genau bekannt sind

> Aufwendige Realisierung der mech. Komponenten und Regelungselektronik

Die PTB besitzt derzeit 5 primäre Uhren - alle sind → großvolumig und → ortsfest

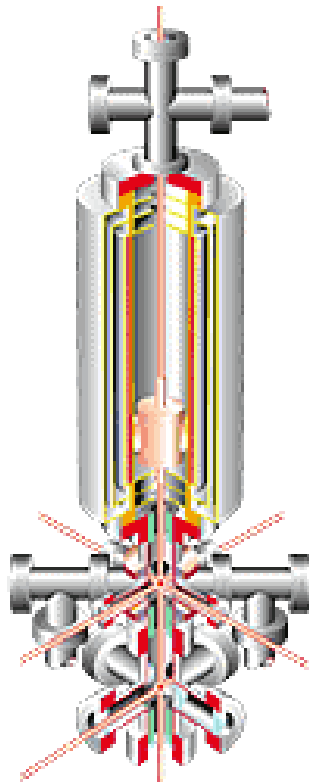
> CS1	in Betrieb seit 1969	Unsicherheit: →	$2,0 \times 10^{-14}$
> CS2	in Betrieb seit 1985	Unsicherheit: →	$1,2 \times 10^{-14}$
> CS3	in Betrieb seit 1988	Unsicherheit: →	$1,4 \times 10^{-14}$
> CS4	in Betrieb seit 1992	Unsicherheit: →	$1,4 \times 10^{-14}$

Seit 1999 arbeitet eine Atomuhr der neuesten Generation die sog. Cäsium-Fontäne

Die CS1 und CS2 waren → lange Jahre → weltweit die → genauesten Atomuhren !!

Insbesondere in den 80er Jahren war die PTB - Zeitskala nachweislich stabiler als >>> die gemittelten Atomzeitskalen anderer renommierter Zeitinstitute <<<

Bei diesen Uhren werden Atome mit Hilfe von Laserlicht eingefangen, abgekühlt
> und ca. 1 m → senkrecht in die Höhe katapultiert und wie das
Wasser in einem Springbrunnen beschreibt die Flugbahn der Atome eine Parabel



Am Anfang sowie am Ende ihres Fluges durchqueren die
Atome das Mikrowellenfeld. Da ihre → Geschwindigkeit
langsamer und ihre → Flugzeit wesentlich länger (ca.100x)

- > sind „Springbrunnen-Uhren“ genauer
- > als „Atomstrahl-Uhren“

Die Unsicherheit der PTB - Fontäne beträgt: $2,0 \times 10^{-15}$

Doch auch die Cäsium-Springbrunnen können nicht mehr
viel genauer werden, die Geräte stoßen allmählich an ihre

>>> technischen und physikalischen Grenzen <<<



Lage: 79 m über N.N. → TAI - Höhenkorrektur: $-8,2 \times 10^{-15}$ sec

- 33 -



Seit 1991 wird die amtliche deutsche Zeit
> von der CS2 abgeleitet

Abweichung von der idealen Atomsekunde:
 $\pm 1,2 \times 10^{-14}$ sec

Die CS2 kann im Mittel von der idealen Uhr
1 sec in 2,5 Mio Jahren abweichen



Die Verbreitung der Zeit gehört zu den gesetzlichen Aufgaben der PTB, sie wird
> über den Langwellensender DCF77 der Deutschen Telekom ausgestrahlt und ist für → jedermann kostenlos zugänglich. Funkuhren in ganz Deutschland (+) sind genauer als 1 Millisec mit der gesetzl. Zeit verbunden



- > Sendefunkstelle Mainflingen - Lage: 50°01'N, 09°00'E
- > Vertikale 150 m hohe Rundstrahlantenne
- > Trägerfrequenz → 77,5 kHz
- > Sendeleistung → 50 kW
- > Reichweite → 2.000 km (+)
- > 24 Stunden Dauerbetrieb



Das Zeitsignal wird am Sendeort von einer Steuereinheit der PTB erzeugt und von Braunschweig aus überwacht.

Notwendige → Korrekturen werden über eine → Fernwirkanlage vorgenommen

Die internationale Forschung konzentriert sich gegenwärtig auf eine Reihe von Projekten, die die Möglichkeiten untersuchen, die sich durch die Verwendung

> lasergekühlter Atome und Ionen (elektr. geladene Atome) ergeben

zum Beispiel forschen: ... das JPL in Pasadena an der Quecksilber - Laserfalle
... die PTB an der Ytterbium - Laserfalle

Man geht davon aus, in absehbarer Zeit eine → Verringerung der Unsicherheit

> d.h. eine relative Ganginstabilität von 10^{-17} ... 10^{-18} zu erreichen !!!

Für eine derart hohe Präzision gibt es eigentlich >> noch keine << konkreten techn. Anwendungen, aber die treibende Kraft (nach wie vor ungebrochen) ist

> der Nobelpreis für Physik

01 : Titel	26 : Die Funktion der Rubidiumuhr
02 : Was also ist Zeit ?	27 : Schema der Rubidiumuhr
03 : Die Grundgrößen der Physik	28 : Die Uhren im Vergleich
04 : Die PTB und die Zeit	29 : Die Gangunsicherheit
05 : Die Sekunde	30 : Gangunsicherheit im Vergleich
06 : Zeit und Frequenz	31 : Primäre Atomuhren der PTB
07 : Die Zeitskala	32 : Die Cäsium - Fontäne
08 : Das astronomische Zeitnormal	33 : Die Atomuhrenhalle der PTB
09 : Die unausgewuchtete Erde	34 : Die Deutsche Mutteruhr
10 : Der internationale Erdrotationsdienst	35 : Die Zeitübertragung
11 : Der Umbruch	36 : ... und wie geht's weiter ?
12 : Das physikalische Zeitnormal	37 : Inhaltsverzeichnis
13 : Die Entwicklung der Atomuhren	38 :
14 : Der NPL - Prototyp	39 :
15 : Das Cäsium	40 :
16 : Das Internationale Büro für Maß und Gewicht	41 :
17 : Die Freie Atomzeit	42 :
18 : Die Internationale Atomzeit	43 :
19 : Die Koordinierte Weltzeit	44 :
20 : Das Welt - Zeitsystem	45 :
21 : Das IERS - Bulletin C 24	46 :
22 : Die Schaltsekunden	47 :
23 : Die Gesetze der Atomphysik	48 :
24 : Die Funktion der Cäsiumuhr	49 :
25 : Schema der Cäsiumuhr	50 :