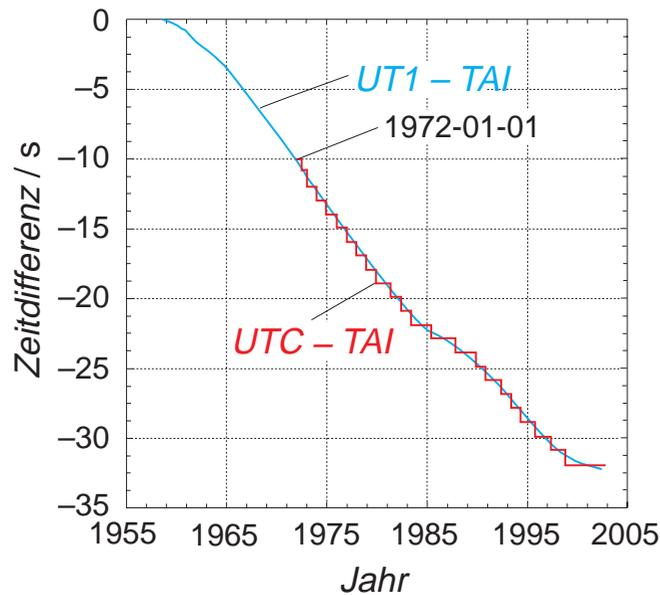


Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland

Die weltweit einheitliche Grundlage für die Bestimmung der im öffentlichen Leben verwendeten Zeit heißt Koordinierte Weltzeit UTC (Coordinated Universal Time) und wird vom Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) berechnet. Ihr Skalenmaß ist die SI-Sekunde, die mit den primären Atomuhren der PTB und anderer Zeitinstitute realisiert wird. UTC ist die Grundlage aller weltweit gebräuchlichen Zonenzeiten, die sich voneinander im allgemeinen um ganze Stunden unterscheiden. Da sich unser tägliches Leben trotz Atomuhren weiterhin nach dem Sonnenstand, d. h. nach der nicht gleichförmigen Erddrehung richtet, wird dafür gesorgt, dass UTC innerhalb von $\pm 0,9$ s der aus astronomischen Beobachtungen gewonnenen „Universal Time“ (UT1, mittlere Sonnenzeit am Nullmeridian durch Greenwich) entspricht. Zu diesem Zweck werden in UTC bei Bedarf Schaltsekunden eingefügt. Im Bild unten ist der Vergleich zwischen UT1, UTC und der Internationalen Atomzeit TAI dargestellt, die von der Erddrehung völlig unabhängig ist. Bei der Einführung von TAI Anfang 1958 wurde TAI an UT1 angeglichen. UTC existiert erst seit 1.1.1972, als der Unterschied UT1 – TAI etwa -10 s betrug. Die von da an eingefügten Schaltsekunden folgten nicht ganz gleichmäßig, gerade so, wie es die Erddrehung vorgab.



Die PTB ist durch das Zeitgesetz von 1978 damit beauftragt, die für den „amtlichen und geschäftlichen Verkehr“ in der Bundesrepublik Deutschland maßgebende Uhrzeit anzugeben und zu verbreiten. Mit einer Gruppe von Atomuhren wird hierfür in der PTB die Zeitskala UTC(PTB) realisiert, die mit UTC innerhalb einiger zehn Milliardstel Sekunden übereinstimmt. Von UTC(PTB) wird die in Deutschland geltende gesetzliche Zeit, die Mitteleuropäische Zeit MEZ bzw. die Mitteleuropäische Sommerzeit MESZ abgeleitet, und es gilt: $MEZ = UTC(PTB) + 1$ Stunde bzw.

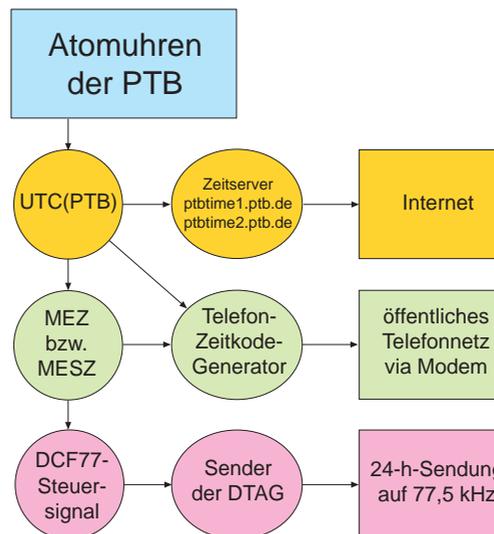
$$MESZ = UTC(PTB) + 2 \text{ Stunden.}$$

Für die Einführung der Sommerzeit gilt die folgende Regelung (BGBl. 2001 Teil 1, Nr. 35, S. 1591):

§ 1: Ab dem Jahr 2002 wird die mitteleuropäische Sommerzeit (§ 1 Abs. 4 des Zeitgesetzes) auf unbestimmte Zeit eingeführt.

§ 2: (1) Die mitteleuropäische Sommerzeit beginnt jeweils am letzten Sonntag im März um 2 Uhr mitteleuropäischer Zeit. Im Zeitpunkt des Beginns der Sommerzeit wird die Stundenzählung um eine Stunde von 2 Uhr auf 3 Uhr vorgestellt.

(2) Die mitteleuropäische Sommerzeit endet jeweils am letzten Sonntag im Oktober um 3 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit. Im Zeitpunkt des Endes der Sommerzeit wird die Stundenzählung um eine Stunde von 3 Uhr auf 2 Uhr zurückgestellt. Die Stunde von 2 Uhr bis 3 Uhr erscheint dabei zweimal. Die erste Stunde (von 2 Uhr bis 3 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit) wird mit 2 A und die zweite Stunde (von 2 Uhr bis 3 Uhr mitteleuropäischer Zeit) mit 2 B bezeichnet.



Schematische Darstellung der Zeitdienste der PTB

UTC und die gesetzliche Zeit werden mittels verschiedener Übertragungsverfahren der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das bekannteste ist die Aussendung von Zeitsignalen und Normalfrequenz über den Sender DCF77. Daneben gestattet der PTB-Telefonzeitdienst, Rechner und Datenerfassungsanlagen über Telefonmodem und das öffentliche Telefonnetz mit genauer Zeit zu versorgen. Zur Synchronisation von Rechneruhren kann UTC(PTB) über das Internet abgefragt werden. Diese Verfahren werden im Folgenden vorgestellt. Weitergehende technische Details sind unter www.ptb.de unter dem Suchbegriff „Zeitübertragung“ zu finden.

Zeitsignal- und Normalfrequenzsender DCF77

Betreiber	Deutsche Telekom AG (DTAG)
Standort	Sendefunkstelle Mainflingen bei Frankfurt/M. (50° 01' Nord, 09° 00' Ost)
Trägerfrequenz	77,5 kHz, von PTB-Atomuhren abgeleitete Normalfrequenz (relative Unsicherheit im Mittel über einen Tag $\leq 2 \cdot 10^{-12}$)
Senderleistung	50 kW, abgestrahlt ca. 30 kW
Reichweite	bis 2000 km
Sendezeit	24-h-Dauerbetrieb

Modulation: Amplitudenmodulation mit Sekundenmarken (0,1 s oder 0,2 s lange Absenkung der Trägeramplitude auf 20 %) und pseudozufällige Modulation der Trägerphase (entsprechend einer binären Zufallsfolge von 2^9 Bits, Taktfrequenz 77 500/120 Hz, Phasenhub $\pm 13^\circ$)

Zeitkode

Während jeder Minute werden die Nummern von Minute, Stunde, Tag, Wochentag, Monat und Jahr durch Impulsdauermodulation der Sekundenmarken kodiert übertragen. Dabei entsprechen Sekundenmarken mit einer Dauer von 0,1 s der binären Null und solche mit einer Dauer von 0,2 s der binären Eins. Die Zuordnung der einzelnen Sekundenmarken auf die übertragene Zeitinformaton zeigt das Kodierschema. Das gesendete „Telegramm“ gilt jeweils für die folgende Minute. Bei der pseudozufälligen Phasenumtastung erfolgt die Kodierung durch Invertieren der verwendeten Pseudozufallsfolge.



Pseudozufällige Modulation der Trägerphase

Zusätzlich zur Amplitudenmodulation (AM) ist dem Träger von DCF77 ein pseudozufälliges Phasenrauschen aufmoduliert. Dazu wird die Phase entsprechend einer binären Zufallsfolge um $\pm 13^\circ$ umgetastet, wobei der Mittelwert der Trägerphase unverändert bleibt. Empfangsseitig lässt sich die verwendete Pseudozufallsfolge als Suchsignal reproduzieren und mit dem empfangenen Phasenrauschen kreuzkorrelieren. Dies erlaubt eine genauere Bestimmung der Ankunftszeitpunkte der empfangenen Zeitsignale. Durch das Phasenrauschen wird der Empfang der AM-Zeitsignale nicht gestört. Auch die Eigenschaften von DCF77 als Normalfrequenzsender werden nicht nennenswert beeinflusst.

Anwendungen von DCF77

Die weitaus größte Anzahl von DCF77-Empfängern werten den über AM übertragenen Zeitcode aus. Funkuhren in ganz Deutschland und den angrenzenden europäischen Staaten lassen sich so genauer als eine Millisekunde in Übereinstimmung mit der gesetzlichen Zeit halten. Die Zeitangaben der Rundfunk- und Fernsehstationen sowie die Uhren der Deutschen Bahn AG und des Zeitansagedienstes der Deutschen Telekom AG werden ebenso von DCF77 gesteuert wie viele Tarifschaltuhren der Energieversorgungsunternehmen, Verkehrsüberwachungseinrichtungen und Ampelanlagen. In Industrie und Wirtschaft werden mit DCF77 Prozessabläufe gesteuert und überwacht. Für den privaten Gebrauch sind eine Vielzahl von Funkuhrmodellen erhältlich. Empfänger, die die Trägerphasenmodulation auswerten, werden im Netzmanagement der Energieversorgungsunternehmen und der Telekommunikation verwendet. DCF77-gesteuerte Normalfrequenzgeneratoren werden in Kalibrierlaboratorien der Industrie und in Forschungseinrichtungen genutzt.



Sendemast von DCF77 in Mainflingen, südöstlich von Frankfurt/M.

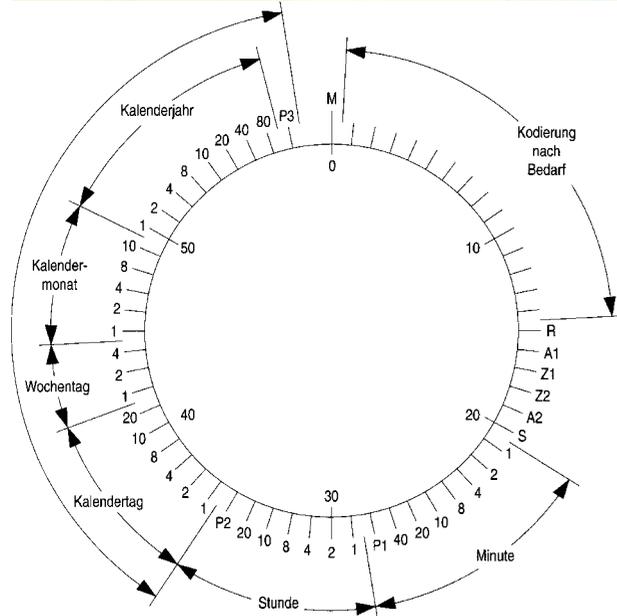
Telefonzeitdienst der PTB über das öffentliche Telefonnetz

Neben der Zeitübertragung über DCF77 bietet die PTB Zeitinformationen über das öffentliche Telefonnetz an. Unter Verwendung von Telefonmodems können Rechner und Datenerfassungsanlagen durch automatischen Zugriff die PTB-Zeit unter der Nummer (05 31) 51 20 38 abfragen. Der Telefonzeitcode besteht aus einer Folge von 80 ASCII-Zeichen, die einmal in jeder Sekunde mit festem zeitlichen Bezug zum Sekundenbeginn abgegeben wird. In jeder Folge sind zahlreiche Informationen enthalten, z. B. Datum, gesetzliche Zeit mit Bezeichnung, Nummer des Wochentages, Nummer der Kalenderwoche, Nummer des Tages im Jahr, Datum

und Uhrzeit der nächsten Umschaltung auf Sommerzeit oder zurück, Koordinierte Weltzeit UTC. Der eingesetzte Zeitcodegenerator bietet die Möglichkeit zur Laufzeitkorrektur und damit zur Zeitübertragung mit einer Unsicherheit von etwa einer Millisekunde.

Internet-Zeitdienst der PTB

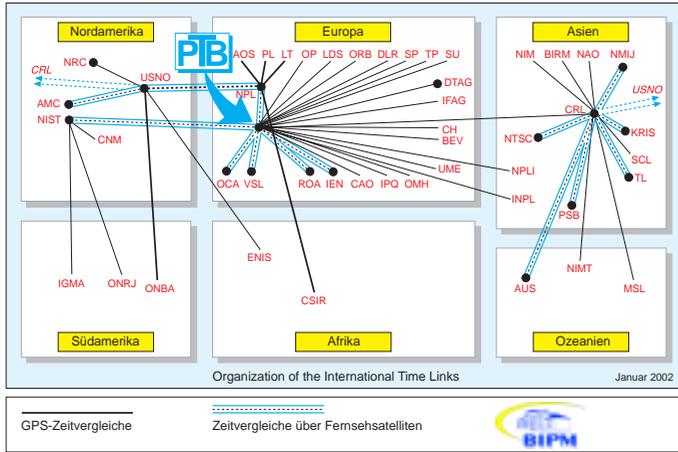
Zur Synchronisation von Rechneruhren über das Internet betreibt die PTB zwei Server. Diese Server benutzen zur Weitergabe der Zeitinformation das für derartige Zwecke entwickelte „Network Time Protocol“ (NTP). Das Protokoll basiert auf dem im Internet benutzten IP-Protokoll und ist für alle relevanten Betriebssysteme verfügbar. Um die Zeitserver der PTB zur Synchronisation eines Rechners nutzen zu können, wird ein Programm benötigt, das dieses Protokoll unterstützt. Für die Betriebssysteme Windows, UNIX, Macintosh u. a. sind derartige Programme unter <http://www.ntp.org> und dort angegebenen Links zu finden. Nach der Installation müssen die Adressen der gewünschten Server hinzugefügt werden. Um die Zeitserver der PTB zu nutzen, müssen die Adressen ptbtime1.ptb.de oder ptbtime2.ptb.de angegeben werden.



DCF77: Reichweite (oben), Kodierschema (unten)

M: Minutenmarke; R: Rufbit; A1: Ankündigung eines bevorstehenden Wechsels von MESZ auf MESZ und umgekehrt; Z1 (Z2): Zeitinformation entspricht MESZ (MESZ); A2: Ankündigung einer Schaltsekunde; S: Startbit der kodierten Zeitinformation (0,2 s); P1, P2, P3: Prüfbits

Die Realisierung von UTC durch das BIPM



Netzwerk zum Vergleich der in den Zeitinstituten k (z. B. PTB) realisierten Atomzeitskalen UTC(k). Zeitvergleiche über Fernsehsatelliten stellen die modernste Form der Vergleiche dar.

Die Koordinierte Weltzeit (UTC) basiert auf Atomuhren in den im Bild oben benannten etwa 50 Zeitinstituten „ k “. Die dort realisierten Atomzeitskalen UTC(k) und die dort betriebenen Atomuhren (ca. 250) werden miteinander verglichen. Hierfür wird überwiegend das Global Positioning System (GPS) verwendet. Die Auswertung der Daten und Berechnung von UTC erfolgt durch das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in Paris.

Das BIPM berechnet durch Mittelung aller Uhren eine freie Atomzeitskala. In einem zweiten Schritt wird daraus die Internationale Atomzeit TAI gewonnen. Ihr Skalenmaß wird mit der von primären Uhren realisierten Sekunde in Übereinstimmung gebracht. Die in der PTB gebauten und betriebenen primären Uhren CS1, CS2, CS3 und CSF1 sind für die Festlegung des Skalenmaßes von TAI seit drei Jahrzehnten entscheidend gewesen. Im dritten Schritt wird, wie anfangs dargelegt, UTC aus TAI durch Einführung von Schaltsekunden gewonnen.

Atomuhren und die SI-Sekunde

Die Sekunde ist eine der Basiseinheiten im internationalen Einheitensystem SI und seit 1967 folgendermaßen definiert:

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.

Die Realisierung der Zeiteinheit nach dieser Definition erfolgt mit Caesium-Atomuhren, die industriell gefertigt oder für höchste Genauigkeitsansprüche von Forschungslaboratorien gebaut und betrieben werden. Weltweit gibt es von letzteren, den sogenannten primären Uhren, nur etwa zehn Exemplare.

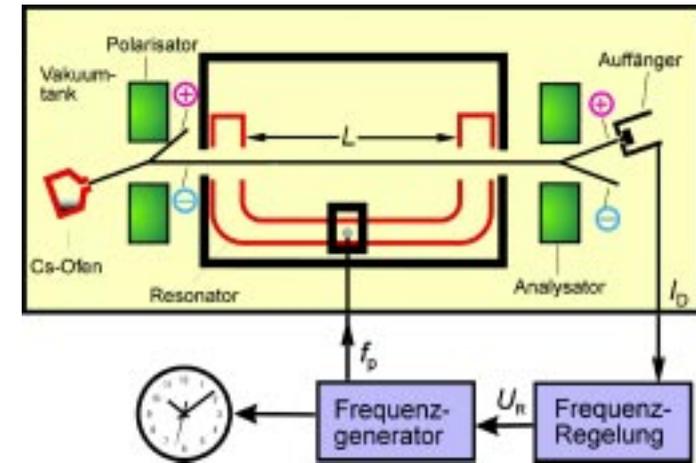
Grundlagen von Atomuhren

Atome kommen in verschiedenen Energiezuständen vor. Der Übergang von einem Zustand zum anderen kann angeregt werden und ist mit Absorption oder Emission elektromagnetischer Strahlung verbunden. Nach den Gesetzen der Atomphysik hat beim Übergang zwischen zwei atomaren Eigenzuständen mit einer Energiedifferenz ΔE diese Strahlung eine Frequenz $f = \Delta E/h$ (h : Planck-Konstante). Die Frequenz f bzw. die Periodendauer $1/f$ einer solchen Strahlung ist daher von wenigen Naturkonstanten festgelegt, anders als die Periode der Erdrotation oder die Schwingungsdauer eines Pendels.



Die primäre Atomuhr CS2 der PTB, mit der zz. UTC(PTB) realisiert wird

Aufbau einer klassischen Cäsium-Atomuhr

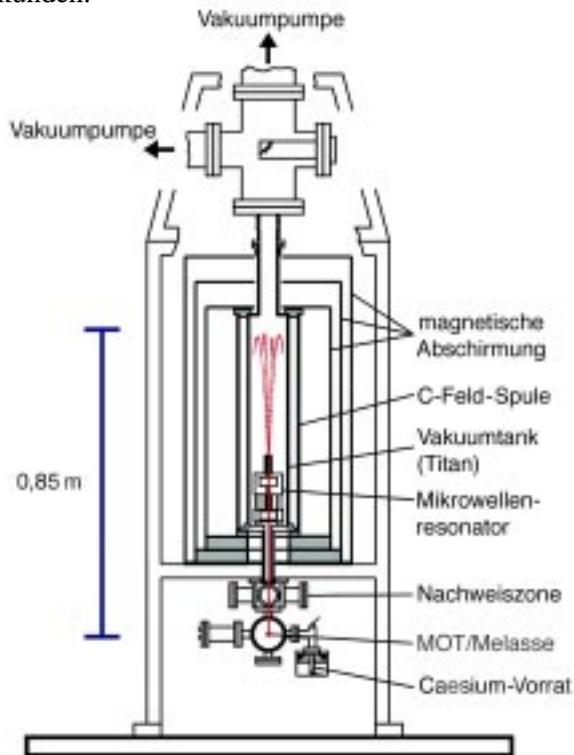


Prinzip einer „klassischen“ Caesium-Atomuhr mit einem thermischen Atomstrahl und magnetischer Selektion. Die beiden beteiligten Zustände des Cäsiumatoms sind mit (+) und (-) bezeichnet.

Im Caesium-Atom tritt ein geeigneter Übergang bei der Frequenz $f_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ auf; er ist die Basis für die Funktion einer Caesium-Atomuhr. In der Vakuumkammer einer Atomuhr werden Caesium-Atome verdampft und es wird ein Atomstrahl erzeugt. Der hinter dem Ofen angeordnete Magnet (Polarisator) lenkt die Atome so ab, dass nur Atome im Zustand (-) in den Hohlraumresonator gelangen. Hier werden die Atome durch Bestrahlung mit einem magnetischen Mikrowellenfeld der Frequenz f_p in den anderen Zustand (+) angeregt. Durch den zweiten Magneten (Analytator) werden dann nur die Atome, die eine Zustandsänderung von (-) nach (+) 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. Eine elektronische Regelung sorgt dafür, dass der Frequenzgenerator auf der Frequenz f_{Cs} gehalten wird. Die Flugzeit T (Strecke L dividiert durch die Geschwindigkeit der Atome) bestimmt die Empfindlichkeit, mit der diese Regelung funktioniert. Durch Abzählen von 9 192 631 770 Periodendauern gewinnt man aus dem Generatorsignal Sekundenimpulse, die mit einem Uhrwerk gezählt werden.

Caesium-Fontänenuhren

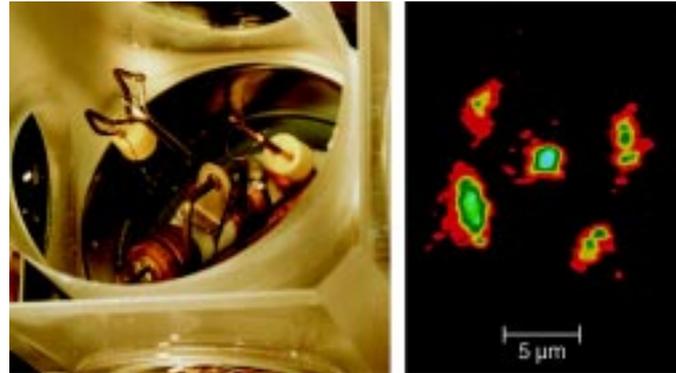
Bei der neuesten Atomuhr der PTB, der Caesiumfontäne CFS1, wird Laserstrahlung zur Präparation und zum Zustandsnachweis der Atome verwendet. Die Laserkühlung in einer magneto-optischen Falle (MOT) oder einer optischen Melasse liefert „kalte“ Atome mit einer thermischen Geschwindigkeit von wenigen mm/s. Diese Atome werden vertikal nach oben beschleunigt und fallen (wie in einer Fontäne) unter dem Einfluss der Schwerkraft wieder zurück. Auf dieser Flugbahn durchqueren sie den Mikrowellenresonator zweimal. Der Nachweis des Zustands, in dem die Atome nach dem zweiten Durchflug durch den Resonator sind, erfolgt durch Anregung mit Laserstrahlung und Nachweis der Fluoreszenzstrahlung. Die Flugzeit T der Atome oberhalb des Mikrowellenresonators ist 50-mal länger als die entsprechende Flugzeit T in CS2. Verschiedene frequenzverschiebende Effekte sind in ähnlichem Maße kleiner, und so kommen Sekunden von CSF1 mit einer Unsicherheit von nur $1 \cdot 10^{-15}$ s (Stand Juni 2004) sehr nahe an ideale SI-Sekunden.



Vertikalschnitt durch die Fontänenuhr CSF1 der PTB

Ein Blick in die Zukunft

In der nächsten Generation von Atomuhren wird die verwendete Referenzfrequenz nicht mehr wie beim Cäsium im Mikrowellenbereich, sondern im Bereich sichtbaren Lichts liegen. Eine mögliche Realisierung einer solchen „optischen Uhr“ beruht auf der Spektroskopie eines einzelnen in einer sogenannten Ionenfalle gespeicherten elektrisch geladenen Atoms. Man erwartet eine weitere Steigerung der Genauigkeit um mindestens einen Faktor 10 gegenüber einer Fontänenuhr.



Ionenfalle der PTB: Elektrodensystem (linkes Bild, Mitte); Registrierung der Fluoreszenz eines von fünf Ytterbium-Ionen gebildeten „Coulomb-Kristalls“ in dieser Falle in Falschfarbendarstellung (rechts)

Titelbild

Ein Atom sendet elektromagnetische Wellen aus. Metallwandschmuck (Bodo Kampmann, 1970) am Eingang zum Zeitlabor der PTB in einer Collage vor der primären Uhr CS2 der PTB

Literaturhinweise

Eine umfangreiche Literaturliste mit Arbeiten sowohl aus der PTB als auch von außerhalb finden Sie unter www.ptb.de unter dem Suchbegriff „Literatur Zeit“, oder erhalten Sie nach Anfrage im Fachlaboratorium *Zeiteinheit* der PTB.

Zur Zeit

