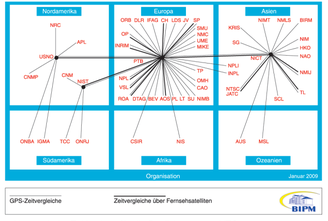
Die Realisierung von UTC



Netzwerk der Zeitinstitute für die Realisierung von UTC

Die Koordinierte Weltzeit (UTC) basiert auf Atomuhren in den im Bild oben benannten etwa 60 Zeitinstituten „k". Die dort realisierten Atomzeitskalen UTC(k) und die dort betriebenen Atomuhren (ca. 400) werden miteinander verglichen. Hierfür werden Signale des Global Positioning System (GPS) registriert und Zeitsignale über Telekommunikationssatelliten ausgetauscht. Die Auswertung der Daten und die 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. Daraus wird die Internationale Atomzeit TAI gewonnen, deren Skalenmaß mit der von primären Uhren realisierten Sekunde in Übereinstimmung gebracht wird. Die in der PTB gebauten und betriebenen primären Uhren CS1, CS2, CSF1 und CSF2 sind für die Festlegung des Skalenmaßes von TAI seit vier Jahrzehnten entscheidend gewesen. Im letzten Schritt wird, wie anfangs dargelegt, UTC aus TAI durch Einfügung von Schaltsekunden gewonnen. Die Anweisung hierfür kommt vom International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS – **www.iers.org**).

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 Hyperfeinstrukturniveaus 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 rund ein Dutzend Exemplare.

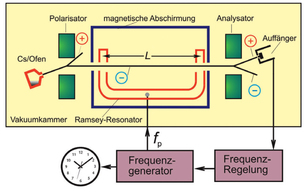
Grundlagen von Atomuhren

Atome kommen in verschiedenen Energiezuständen vor. Der Übergang von einem Zustand zum anderen kann mittels elektromagnetischer Strahlung angeregt werden.

Die primäre Atomuhr CS2 der PTB, die 1986 in Betrieb ging

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. In der Praxis ist die beobachtete Übergangsfrequenz verschiedenen Einflüssen und statistischen Schwankungen unterworfen. Mit CS2 der PTB erreicht man eine Unsicherheit der Realisierung der Zeiteinheit von $1 \cdot 10^{-14}$ s.

Aufbau einer klassischen Caesium-Atomuhr

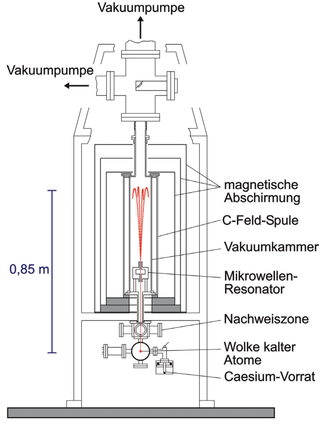


Prinzip einer „klassischen" Caesium-Atomuhr mit einem thermischen Atomstrahl und magnetischer Selektion. Die beiden beteiligten Zustände des Caesiumatoms sind mit (+) und (–) bezeichnet.

Im Caesiumatom tritt ein geeigneter Übergang bei der Frequenz f_{Cs} = 9 192 631 770 Hz auf; er ist die Basis für die Funktion einer Caesium-Atomuhr. In der Vakuumkammer einer Atomuhr werden Caesiumatome 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 U-förmigen Ramsey-Resonator gelangen. Hier werden die Atome durch Bestrahlung mit einem Mikrowellenfeld der Frequenz f_p in den anderen Zustand (+) angeregt. Durch den zweiten Magneten (Analysator) 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 (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

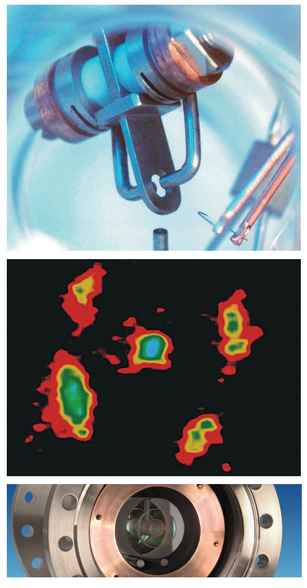
Bei den neuesten Atomuhren der PTB, den Caesiumfontänen CSF1 und CSF2, wird Laserstrahlung zur Präparation und zum Zustandsnachweis der Atome verwendet. Die Laserkühlung in einer magneto-optischen Falle (MOT) oder einer optischen Melasse liefert „kalte" Atome mit einer thermischen Geschwindigkeit von wenigen mm/s. Diese Atome werden vertikal nach oben beschleunigt und fallen (wie in einer Fontäne) unter dem Einfluss der Schwerkraft wieder nach unten. Auf dieser Flugbahn durchqueren sie den Mikrowellenresonator zweimal. Der Nachweis des Zustands, in dem sich die Atome nach dem zweiten Durchflug durch den Resonator befinden, erfolgt durch Anregung mit Laserstrahlung und Nachweis der Fluoreszenzstrahlung. Die Flugzeit der Atome oberhalb des Mikrowellenresonators ist 50-mal länger als die entsprechende Flugzeit in CS2. Verschiedene frequenzverschiebende Effekte sind in ähnlichem Maße kleiner, und so kommen Sekunden von CSF1 und CSF2 mit einer Unsicherheit von nur wenigen 10^{-16} s sehr nahe an ideale SI-Sekunden heran.



Vertikalschnitt durch die Fontänenuhr CSF1 der PTB

Ein Blick in die Zukunft

Bei der nächsten Generation von Atomuhren wird die verwendete Referenzfrequenz nicht mehr wie beim Caesium 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 erreicht so eine weitere Steigerung der Genauigkeit um mindestens einen Faktor 10 gegenüber einer Fontänenuhr.

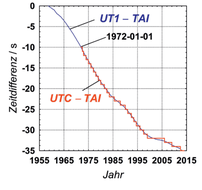


Optische Atomuhr auf der Basis eines gespeicherten Ytterbium-Ions: Elektrodensystem der in der PTB entwickelten Ionenfalle (oben); „Coulomb-Kristall" mit fünf lasergekühlten Ionen in dieser Falle (Mitte, Falschfarbendarstellung); optischer Referenzresonator zur Laserstabilisierung (unten, Blick in die Vakuumkammer)

Zur Zeit

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). 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 ± 0,9 s der aus astronomischen Beobachtungen gewonnen „Universal Time“ (UT1, mittlere Sonnenzeit am Nullmeridian durch Greenwich) entspricht. Zu diesem Zweck werden in UTC bei Bedarf Schaltsekunden eingefügt. Im Bild oben ist der Vergleich zwischen UT1, UTC und der von der Erddrehung unabhängigen Internationalen Atomzeit TAI dargestellt. Bei der Einführung von TAI Anfang 1958 wurde TAI an UT1 angeglichen. UTC existiert erst seit dem 1.1.1972, als der Unterschied UT1 – TAI etwa 10 s betrug. Da sich die Erde ungleichmäßig schnell dreht, folgen auch die Schaltsekunden in wechselndem zeitlichen Abstand.



Die PTB ist durch das Einheiten- und Zeitgesetz seit 2008 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 von 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:

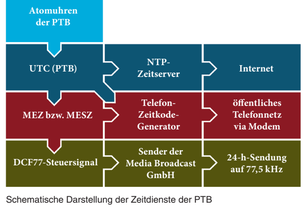
MEZ = UTC(PTB) + 1 Stunde bzw.
MESZ = UTC(PTB) + 2 Stunden.

Für die Einführung der Sommerzeit gilt weiterhin 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 von 1978) 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

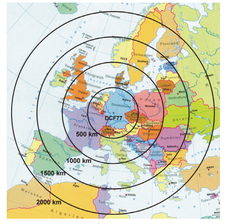
UTC und die gesetzliche Zeit werden mittels verschiedener Übertragungsverfahren der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das bekannteste ist die Aussendung von Zeitsignalen und Normalfrequenz über den Sender DCF77. Daneben gestattet es der PTB-Telefonzeitdienst, Rechner und Datenerfassungsanlagen über 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/zeit/** unter der Verknüpfung „Zeitübertragung“ zu finden.

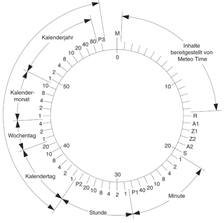
Zeitsignal- und Normalfrequenzsender DCF77

Betreiber:	Media Broadcast GmbH
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 ≤ $2 \cdot 10^{-12}$)
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 15 %) und pseudozufällige Modulation der Trägerphase (entsprechend einer binären Zufallsfolge von 2⁹ Bits, Taktfrequenz 77 500/120 Hz, Phasenhub ± 14,3°)

Zeitkode

Während jeder Minute werden die Nummern von Minute, Stunde, Tag, Wochentag, Monat und Jahr durch Impulsdauer-Modulation der Sekundenmarken kodiert übertragen. Dabei entsprechen Sekundenmarken mit





DCF77: Reichweite (oben), Kodierschema (unten)
M: Minutenmarke; R: Reservebit; A1: Ankündigung eines bevorstehenden Wechsels von MEZ auf MESZ und umgekehrt; Z1 (Z2): Zeitinformation entspricht MEZ (MESZ); A2: Ankündigung einer Schaltsekunde; S: Startbit der kodierten Zeitinformation (0,2 s); P1, P2, P3: Prüfbits

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 Zeit-information zeigt das Kodierschema. Das gesendete „Telegramm“ gilt jeweils für die folgende Minute.

Pseudozufällige Modulation der Trägerphase

Zusätzlich zur beschriebenen Amplitudenmodulation (AM) ist dem Träger von DCF77 ein pseudozufälliges Phasenrauschen aufmoduliert. Dazu wird die Phase entsprechend einer binären Zufallsfolge um ±14,3° umgetastet, wobei der Mittelwert der Trägerphase unverändert bleibt. Bei der pseudozufälligen Phasenumtastung erfolgt die Kodierung durch Invertieren der verwendeten Pseudozufallsfolge. 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.

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

Anwendungen von DCF77

Die allermeisten DCF77-Empfänger werten den über AM übertragenen Zeitkode 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.

Telefonzeitdienst der PTB über das öffentliche Telefonnetz

Die PTB bietet Zeitinformationen über das öffentliche Telefonnetz an. Unter Verwendung von Telefonmodems können Rechner und Datenerfassungsanlagen durch automatischen Zugriff die PTB-Zeit unter der Nummer (0531) 51 20 38 abfragen. Der Telefonzeitkode 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, Nummer des Wochentages, der Kalenderwoche, des Tages im Jahr, Datum und Uhrzeit der nächsten Umschaltung auf Sommerzeit oder zurück sowie die Koordinierte Weltzeit UTC. Der eingesetzte Zeitkodegenerator bietet die Möglichkeit zur Laufzeitkorrektur und damit zur Zeitübertragung mit einer Unsicherheit von etwa einer Millisekunde. Die Mehrzahl der Anrufe erfolgt von Messstationen an den Gaspipelines in unserem Land.

Internetzeitdienst der PTB

Zur Synchronisation von Rechneruhren über das Internet betreibt die PTB drei Server. Diese Server benutzen zur Weitergabe der Zeitinformation das für derartige Zwecke entwickelte „Network Time Protocol“ (NTP). Informationen hierzu findet man unter **www.ntp.org.** 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. Um die Zeitserver der PTB zu nutzen, müssen die Adressen **ptbtime#.ptb.de** (# = 1, 2 oder 3) angegeben werden.

Titelbild
Die Caesium-Fontänenuhr CSF2 der PTB

Literaturhinweise
Eine umfangreiche Literaturliste mit Arbeiten sowohl aus der PTB als auch von außerhalb finden Sie unter **www.ptb.de/zeit** unter der Verknüpfung „**Veröffentlichungen und Literatur**“ oder erhalten Sie auf Anfrage im Fachbereich **Zeit und Frequenz** der PTB.

Impressum

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

4.4 | Zeit und Frequenz
Telefon: (0531) 592-4401
Fax: (0531) 592-4479
E-Mail: time@ptb.de
www.ptb.de

Stand: 07/13