

Atomuhren, Weltzeit und das Drumherum

Dirk Piester und Andreas Bauch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig,
E-Mail: dirk.piester@ptb.de

— Manuskript —

Wo kommt die Weltzeit her? Welche Rolle spielen die Atomuhren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt dabei? Wie wird in Deutschland die Zeit gemacht und wie wird sie verbreitet? Diese Fragen werden im Folgenden erörtert.

Die Einheit Sekunde, Zeichen „s“, ist eine der sieben Basiseinheiten der Physik, und zwar die, die mit der kleinsten Unsicherheit von allen realisierbar ist. Das hilft bei der Messung von Zeitintervallen (Stichwort: Stoppuhr) oder der Angabe von Frequenzen (in der Einheit Hertz: $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$) oder der Zählung von wiederkehrenden Ereignissen pro Zeiteinheit. Die im täglichen Leben wohl wichtigere Frage beginnt aber mit „Wann?“; und so kommt ein weiterer Begriff ins Spiel: die Uhrzeit. Die „Zeitmessung“ stellt wegen der Vielzahl der Bezüge ein weites Feld dar, welches vom Alltag über verschiedene Stufen bis hin zur Grundlagenforschung reicht. Wichtige Anwendungen sind unter anderem die Synchronisation von Datennetzen oder die Laufzeitmessungen zur Ortsbestimmung mithilfe von Satellitennavigationssystemen wie dem amerikanischen Global Positioning System GPS oder dem europäischen Galileo. Themen der Grundlagenforschung sind oft eng mit der Relativitätstheorie verknüpft: Sind Einsteins Erkenntnisse auch noch an der 17ten Kommastelle richtig? Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB ist in vielen Feldern der Zeitmessung aktiv. Grundlage hierfür ist die Entwicklung und der Betrieb moderner Atomuhren. Deren messtechnische Charakterisierung sowie die Weitergabe der Zeiteinheit und der gesetzlichen Zeit an Industrie und Gesellschaft sind ein wichtiger Teil der Aktivitäten. Im nachfolgenden Text wird als Schwerpunkt auf die Frage, wie die Zeit in Deutschland „gemacht“ wird, eingegangen.

Die in Deutschland im amtlichen und geschäftlichen Verkehr zu verwendende Zeit ist im Einheiten- und Zeitgesetz festgelegt und die PTB mit deren „Darstellung und Verbreitung“ beauftragt. Was bedeutet das für unsere Arbeit? Um die gesetzliche Zeit für Deutschland zu realisieren, wird in Braunschweig eine Gruppe von Atomuhren

betrieben. Aus dieser Gruppe wird eine Referenzuhr ausgewählt und so geregelt, dass sie genau und gleichmäßig als Skalenmaß die Sekunde, wie sie im internationalen Einheitensystem SI definiert ist, wiedergibt sowie in ihrem Stand möglichst nah an der Koordinierten Weltzeit UTC (engl. Coordinated Universal Time) liegt. Die Referenzuhr der PTB tickt damit praktisch mit UTC im Gleichtakt. Die Verbreitung geschieht über die kontinuierliche Bereitstellung zweier elektrischer Signale: einer hochstabilen Referenzfrequenz und Sekundenpulsen, deren ansteigende Flanken den Sekundenbeginn anzeigen. Die Uhrzeit kommt dann im nächsten Schritt durch eine „Etikettierung“ ins Spiel, indem jedem Sekundenpuls die jeweilige Uhrzeit zugeordnet wird. Gesetzliche Zeit ist die Mitteleuropäische Zeit MEZ, bzw. Mitteleuropäische Sommerzeit MESZ (gültig vom letzten Sonntag im März bis zum letzten Sonntag im Oktober eines Jahres) und wird von der an der PTB existierenden Zeitskala UTC(PTB) wie folgt abgeleitet:

$$\begin{aligned} \text{MEZ(PTB)} &= \text{UTC(PTB)} + 1 \text{ h,} \\ \text{MESZ(PTB)} &= \text{UTC(PTB)} + 2 \text{ h.} \end{aligned}$$

Ganz allgemein wird für die physikalische Realisierung einer Zeitskala – wenn möglich – eine Gruppe von Atomuhren betrieben, die kontinuierlich laufen und die untereinander verglichen werden. Dabei handelt es sich zum größten Teil um kommerziell erhältliche Cäsiumuhren und sogenannte Wasserstoffmaser mit jeweils charakteristischen Eigenschaften [1]. Beide Arten findet man z. B. auch in den Bodensegmenten der Satellitennavigationssysteme GPS und Galileo und letztere werden auch an astronomischen Observatorien eingesetzt, speziell solchen, die über Radioteleskope verfügen (Schlagwort: Very Long Baseline Interferometry VLBI). Die Aufgabe der Uhren ist die zuverlässige Bereitstellung hochstabiler Frequenz- und

Zeitsignale. Auch wird Messtechnik benötigt, die eine Stabilitätsanalyse aller Uhren untereinander ermöglicht. Einige Zeitinstitute (vornehmlich die der großen Industrieländer) entwickeln und betreiben auch sog. primäre Cäsiumuhren. Das sind Uhren, die möglichst genau SI-Sekunden liefern und für die es zu jeder Betriebszeit eine Abschätzung der dabei auftretenden Unsicherheit gibt. Die besten Uhren dieser Art sind sogenannte Cäsium-Fontänenuhren. Mit ihnen ist es möglich die Sekunde bis auf 16 Stellen nach dem Komma genau zu realisieren. An der PTB werden zwei dieser Uhren verwendet, u. a. um Wasserstoffmaser in ihrer Frequenz für die Realisierung von UTC(PTB) wie zuvor beschrieben zu kalibrieren. In **Bild 1** sind die beiden Fontänenuhren CSF1 und CSF2 zu sehen.



Bild 1 Ansicht der beiden Cäsium-Fontänenuhren CSF1 (hinten) und CSF2 (vorne) der PTB.

Intern werden die Uhren der PTB, es sind gegenwärtig zehn, kontinuierlich miteinander verglichen. Die Standardabweichungen der Uhren in Bezug auf UTC(PTB) werden nach einem festgelegten Verfahren erhoben und dann dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in Paris zur Verfügung gestellt [2]. Dies geschieht in ähnlicher Weise in ca. 70 Zeitinstituten weltweit und man kommt auf eine Gesamtzahl von rund 400 Atomuhren. Untereinander vergleichen die Zeitinstitute ihre jeweiligen Referenzzeitskalen UTC(k) mit

Methoden satellitengestützter Zeit- und Frequenzvergleiche. Das Rückgrat bilden dabei derzeit Vergleiche mithilfe des Global Positioning Systems GPS. Einige Institute betreiben darüber hinaus Sende- und Empfangsantennen für Zwei-Weg-Vergleiche über Telekommunikationssatelliten [3]. Auf diese Weise sind alle Zeitskalen und somit auch alle Uhren miteinander verknüpft. Aus den gesammelten Messwerten wird dann am BIPM in einem mehrstufigen Prozess die koordinierte Weltzeit UTC generiert. In **Bild 2** ist das Prinzip dieser Berechnung dargestellt. Der erste Schritt ist, aus den weltweit vorhandenen Uhren einen Mittelwert zu bilden, der durch die Verwendung vieler Uhren eine hochstabile Referenz darstellt. Die Beiträge der einzelnen Uhren werden nach einer Stabilitätsanalyse gewichtet. Das Resultat ist die Freie Atomzeitskala EAL (Echelle Atomique Libre). Wichtig hierbei ist, eine möglichst hohe Gleichmäßigkeit und damit auch eine hohe Vorhersagbarkeit zu erzielen. Im zweiten Schritt wird nun diese Zeitskala mit den primären Uhren verglichen und so kalibriert, dass ihr Skalenmaß im langzeitigen Mittel möglichst gut die SI-Sekundendauer repräsentiert. Die dafür verwendeten primären Uhren sind heute hauptsächlich Cs-Fontänenuhren, von denen es ca. 12 Stück auf der Welt gibt. Die kalibrierte Zeitskala wird Internationale Atomzeit TAI (Temps Atomique International) genannt. Sie ist eine Zeitskala, die im Jahre 1972 eingeführt wurde und nur auf dem Betrieb von Atomuhren beruht. Das heißt, sie ist unabhängig von jeglichen astronomischen Beobachtungen, anders als es in vorhergehenden Definitionen der Sekunde und bei der von der astronomischen Sekunde bestimmten Weltzeit UT (Universal Time) der Fall war. Trotzdem bleibt die Erdrotation auch heute nicht außen vor. Der Internationale Erdrotationsservice IERS [4] bestimmt aus VLBI-Daten die Lage und Rotationsparameter der Erde und leitet daraus die mittlere Ortszeit am Nullmeridian durch Greenwich ab. Die Zeitskala wird Universal Time 1 (UT1) genannt. Ziel ist es nun, eine Atomzeit zu generieren, deren Skalenmaß bestmöglich der SI-Sekunde entspricht, aber deren „Uhrzeit“ der mittleren Ortszeit am Längengrad Null (Greenwich) nahekommt. Den Kompromiss stellt die Koordinierte Weltzeit UTC (Universal Coordinated Time) dar. Ihr Skalenmaß ist die SI-Sekunde, aber die Uhrzeit weicht nicht mehr als 0.9 s von der mittleren Ortszeit von

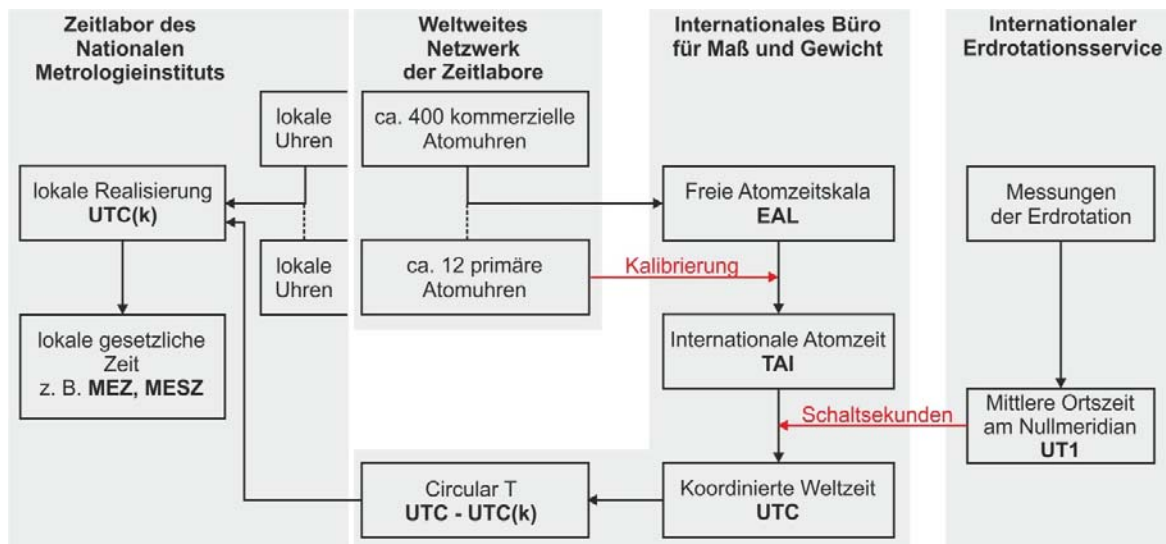


Bild 2 Schema der Realisierung der Internationalen Atomzeit und der Koordinierten Weltzeit.

Greenwich ab. Das wird sichergestellt durch das Einfügen von Schaltsekunden, in der Regel so, dass die Differenz $|UT1 - UTC| < 0.5 \text{ s}$ bleibt. Die letzte Schaltsekunde wurde 2012 eingefügt. Am 30. Juni 2015 kommt die nunmehr 26. Schaltsekunde hinzu. Zusammen mit 10 Sekunden, die früher auf andere Weise eingefügt wurden, wächst die Differenz zwischen TAI und UTC dann auf 36 s an. Ein Weglassen von Sekunden war aufgrund der Verlangsamung der Erdrotation bis jetzt nicht nötig.

UTC ist die weltweite Referenzzeitskala für technische, wissenschaftliche aber auch alltägliche Anwendungen, und im monatlichen Bulletin Circular T veröffentlicht das BIPM die Ablage der Zeitskalen der beitragenden Zeitlabore: $UTC - UTC(k)$. $UTC(PTB)$ wich in den vergangenen Jahren nie um mehr als 10 ns von UTC ab. In **Bild 3** sind neben der Zeitskala der PTB noch die des französischen Observatoire de Paris (OP) und des United States Naval Observatory (USNO) dargestellt. Letzteres ist für die Systemzeit des Global Positioning Systems GPS zuständig.

Die PTB verbreitet die Zeit für Deutschland auf unterschiedliche Weise. Zu nennen ist die Rechner-synchronisation, zum einen über das Internet mithilfe von NTP-Servern, zum

anderen über das Telefonnetz, eine Technik die hauptsächlich von Energieversorgern genutzt wird. Das meist genutzte Mittel für die Verbreitung der Zeit in Deutschland ist der Langwellensender DCF77 [5]. Am Standort des Senders (Mainflingen in der Nähe von Frankfurt am Main) betreibt die PTB drei kommerzielle Cs-Atomuhren, die vor Inbetriebnahme am Sender in Braunschweig in Bezug auf $UTC(PTB)$ kalibriert wurden. Jede der Atomuhren speist je ein elektronisches Steuergerät, welches das Sendesignal erzeugt. In jeder Minute des Signals ist die komplette Zeitinformation der folgenden Minute kodiert enthalten. Nach interner Prüfung der Übereinstimmung untereinander wird eines der Signale auf 77,5 kHz ausgestrahlt und kann mit einer Sendeleistung von 30 kW in Deutschland und sogar nahezu in ganz Europa

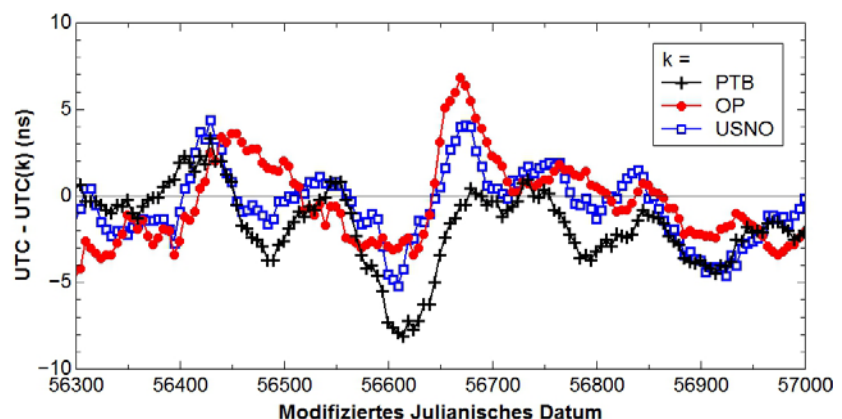


Bild 3 Differenz $UTC - UTC(k)$ der realisierten Zeitskalen dreier ausgewählter Institute k in Bezug zur koordinierten Weltzeit über einen Zeitraum von rund zwei Jahren. Das modifizierte Julianische Datum MJD ist eine Tageszählung, bei der MJD 56300 dem 8. Januar 2013 und MJD 57000 dem 9. Dezember 2014 entspricht.

von Funkuhren empfangen werden. In **Bild 4** ist die 150 m hohe reusenförmige Sendeanenne zu sehen, die zwischen zwei Spannmasten aufgehängt ist.



Bild 4 Antennenhaus mit darüber hängender Antenne des Langwellensenders DCF77.

Von Braunschweig aus wird die Einrichtung inklusive der Gang der Uhren überwacht. Wenn geringfügige Abweichungen auftreten, werden diese ausgeregelt, so dass im Mittel die ausgesendete Zeit der in Braunschweig realisierten gesetzlichen Zeit entspricht.

Die allermeisten DCF77 Empfänger sind Funkuhren des Massenmarktes. Davon sind schätzungsweise über 100 Millionen in Betrieb. Diese Uhren zeigen die Zeit sekundengenau an. Für den professionellen Bereich gibt es Funkuhren, die sich mit einer Genauigkeit von wenigen 10 μs synchronisieren. Da spielt schon die Signallaufzeit vom Sender zur Uhr eine Rolle. Bei einer Entfernung von 100 km vom Sender benötigt das Signal eine Zeit von rund 330 μs , was etwa das Zehnfache der erreichbaren Genauigkeit ist und wird daher in entsprechenden Funkuhren als Korrektur angebracht. Für kritische Anwendungen (im professionellen Bereich) werden häufig Uhrenanlagen eingesetzt, die verschiedene Zeitquellen (DCF77, GPS, NTP)

abfragen, um aus Sicherheitsgründen die Redundanz der Zeitinformation für eine Plausibilitätskontrolle zu verwenden. Auch ist der Zugriff auf eine Normalfrequenz als Referenz z.B. für Kalibrierlaboratorien von Bedeutung. Dazu wird ein lokaler Oszillator mithilfe eines DCF77- oder GPS-Empfängers so nachgeregelt, dass seine Frequenz im ersten Fall unmittelbar oder im zweiten Fall mittelbar auf die primären Uhren der PTB zurückgeführt ist.

Zusammenfassend bilden die weltweit verteilten Uhren ein Netzwerk, welches in hohem Maße genau und zuverlässig die Basis für die Zeit weltweit und darin eingebettet auch unsere Zeit in Deutschland bereitstellt. Ohne genaue Zeitmessung wären z.B. Satellitennavigation oder Telekommunikation in der heutigen Form nicht realisierbar. Die internationale Vernetzung und Zusammenarbeit der verschiedenen Institute ist dabei ein äußerst wichtiger Aspekt und schafft ein spannendes Arbeits- und Forschungsfeld mit einem hohen Anteil an Praxisbezug. Weiterführende Informationen sowie Literaturstellen findet der interessierte Leser z. B. in [6]. Die in der Literaturliste angegebenen Artikel aus den PTB-Mitteilungen sind über die Internetseiten der PTB zugänglich [7].

Literatur

- [1] E. Peik, A. Bauch: **Wozu brauchen wir genauere Uhren?**; PTB-Mitteilungen, vol. 119, no. 2, pp. 123-130, 2009.
- [2] www.bipm.org
- [3] D. Piester, H. Schnatz: **Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken**; PTB-Mitteilungen, vol. 119, no. 2, pp. 131-143, 2009.
- [4] www.iers.org
- [5] D. Piester, P. Hetzel, A. Bauch: **Zeit- und Normalfrequenzverbreitung mit DCF77**; PTB-Mitteilungen, vol. 114, no. 4, pp. 345-368, 2004.
- [6] A. Bauch: **Zeit – Die SI-Basiseinheit Sekunde**; PTB-Mitteilungen, vol. 122, no. 1, pp. 23-36, 2012.
- [7] www.ptb.de