## Wie Zeit gemacht wird

Wie die international gültige Weltzeit UTC bestimmt wird – und was die Relativitätstheorie dabei für eine Rolle spielt

### **Ein Artikel von Andreas Bauch**

In Wissenschaft und Technik ist Zeit – Einstein wusste es – relativ: Es gibt in der Natur keine allgemein gültige, allein aus den physikalischen Gesetzen ableitbare Definition der Gleichzeitigkeit. Und doch ist es in der Praxis sehr wichtig, sich zumindest per Konvention auf eine einheitliche Zeit zu einigen. Zur Synchronisierung von Telekommunikationsnetzen, von Energieversorgung und Navigationssystemen beispielsweise müssen bestimmte Prozesse und Schaltvorgänge an verschiedenen Orten auf der Erde sogar auf Millionstel Sekunden genau aufeinander abgestimmt sein!

Die bei weitem wichtigste solche Konvention bestimmt, wie die Koordinierte Weltzeit (UTC, Universal Coordinated Time) definiert ist. UTC ist die Grundlage der Zeitbestimmung weltweit, für technisch-wissenschaftliche Anwendungen ebenso wie im täglichen Leben. Sie entsteht in Zusammenarbeit zwischen Zeitinstituten in den einzelnen Ländern, dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht BIPM ("Bureau International des Poids et

Mesures") und dem <u>IERS</u> ("International Earth Rotation and Reference Systems Service"). Wie geht das im Einzelnen vor sich?

## Gewünschte Eigenschaften von UTC

An eine Weltzeit werden hohe Ansprüche gestellt. Zum einen soll sie ohne großen Aufwand jedermann und überall zuverlässig zur Verfügung stehen. Zum zweiten soll sie ein hohes Maß an Stabilität aufweisen: Jede Weltzeit-Sekunde sollte so lange dauern wie jede andere Weltzeit-Sekunde – aufgrund der begrenzten Ganggenauigkeit selbst der besten Uhren bei weitem keine triviale Forderung. Außerdem sollen die Weltzeit-Sekunden natürlich gerade so lang sein wie die im internationalen Einheitensystem SI definierte Zeiteinheit Sekunde.

Mit anderen Worten, die zur Definition der Weltzeit verwandten Uhren sollten einer *idealen Uhr* so nahe wie möglich kommen – das wäre eine Uhr, deren Sekundenschritte zu jeder Zeit genau der Sekunde des internationalen Einheitensystems entsprechen.

Andererseits soll UTC aber zumindest näherungsweise erlauben, die traditionelle Zeitmessung fortzuführen, die sich ja bekanntlich aus der Erdrotation ableitet und beispielsweise die Durchschnittslänge eines Tages verwendet, um die Dauer einer Stunde, Minute oder Sekunde festzulegen ("mittlere Sonnenzeit").

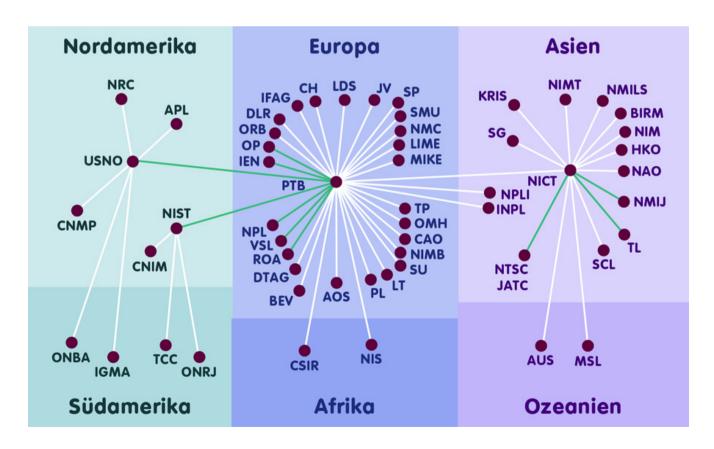
## Zuverlässigkeit im Verbund

Eine einzelne Uhr, und sei sie noch so gut im landläufigen Sinn, kann als Basis der Weltzeit nicht ausreichen. Zum einen könnte sie eben doch jeden Moment stehen bleiben. Zum anderen ist es bei einer einzelnen Uhr unmöglich festzustellen, wie stark ihre Sekundenlänge mit der Zeit schwankt. Das gelingt nur bei einem größeren Ensemble von Uhren – dort kann man im Vergleich mit dem Mittelwert abschätzen, um wieviel die einzelnen beteiligten Uhren vom Ideal abweichen.

Dementsprechend wird das Rückgrat der Weltzeit durch eine Gruppe von derzeit rund 300 Uhren gebildet, die über die ganze Welt verteilt sind. Betrieben werden sie von etwa 70 verschiedenen Institutionen, von nationalen Metrologieinstituten (wie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig) bis hin zu Einrichtungen, die Forschungen auf den Gebieten Raumfahrt, Astronomie, Geodäsie oder Telekommunikation betreiben. Zum Einsatz kommen Uhren, die aufgrund ihrer Funktionsweise bereits höchste Genauigkeit versprechen, nämlich die allergenauesten Atomuhren:

Caesiumatomuhren und Wasserstoffmaser.

Über die Gänge der beteiligten Atomuhren wird dabei nach einem genau vorgegebenen Verfahren gemittelt – aus den aufeinanderfolgenden Sekundenticks der verschiedenen Uhren wird eine Art "mittlerer Sekunde" gewonnen. Dazu wählt jedes der Institute eine seiner Uhren als lokale Referenz und gibt der von ihr abgegebenen Folge von Sekundenticks die Bezeichnung UTC(X) - das X steht dabei für den Institutsnamen; die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) beispielsweise realisiert auf diese Weise eine Zeit UTC(PTB). Mit Hilfe von Funksignalen werden diese verschiedenen Zeitskalen untereinander verglichen, so dass man die Zeitunterschiede zwischen ihnen mit einer Unsicherheit von wenigen Milliardstel Sekunden kennt. (Wie sich Zeit zu Vergleichszwecken von einem Ort zum anderen übertragen lässt, wird im Vertiefungsthema Zeitbestimmung mit Radiosignalen – von der Funkuhr zur Satellitennavigation beschrieben.) Diese Vergleiche geschehen in einer baumartige Struktur, die in der folgenden Abbildung zu sehen ist:



Jede Verbindungslinie darin steht für einen Zeitvergleich UTC(X) – UTC(Y) zwischen den Instituten X und Y. Bei rot

gezeichneten Linien dient das SatellitenNavigationssystem GPS als Vergleichsmittel. Bei grünen
Linien werden zusätzlich Vergleiche mittels Funksignalen
vorgenommen, die mit genau der gleichen Art von Satellit,
wie sie auch bei Fernsehübertragungen zum Einsatz
kommt, zwischen den betreffenden Instituten hin- und
hergeschickt werden. Besonders wichtig für die
Vergleiche sind die Knotenpunkte, an denen die Linien
zusammenlaufen: die Physikalisch-Technische
Bundesanstalt in Braunschweig (PTB), das United States
Naval Observatory in Washington, D.C. (USNO), das
ebenfalls US-amerikanische National Institute of
Standards and Technology in Boulder, Colorado (NIST)
und das National Institute of Information and
Communications Technology in Tokio (NICT).

Alle diese Vergleiche werden regelmäßig durchgeführt und die Ergebnisse dem bereits kurz erwähnten Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) zur Verfügung gestellt. Zusätzlich übermittelt jedes Institut X die Zeitdifferenz zwischen UTC(X) und der Zeitmessung der weiteren dort betriebenen Uhren. Bei kleinen Instituten kann dies nur eine einzige weitere Uhr betreffen; andere Institute leisten sich den Luxus von zehn, zwanzig oder sogar noch mehr Atomuhren. In den ersten Tagen jedes Monats berechnet das BIPM aus den im Laufe des Vormonats gesammelten Messwerten eine Zeitskala, die EAL (für "Echelle atomique libre", etwa: freie Atomuhr-Zeit) genannt wird. In die Bestimmungsgleichung für EAL

gehen Sekundenlängen aller beteiligten Uhren aus dem Vormonat ein, und zwar unterschiedlich gewichtet. Wieviel Gewicht einer Uhr zukommt, ergibt sich aus ihrem Wohlverhalten während der zwölf vorangehenden Monate. Je weniger der Gang einer Uhr in dieser Zeit von Monat zu Monat geschwankt hat, umso größeres Gewicht wird ihr beigemessen. Das praktische Ergebnis des ganzen Berechnungsverfahrens sind eine Reihe von Zahlenwerten, die für jedes beteiligte Institut X angeben, wieweit UTC(X) in dem betreffenden Monat vom errechneten Wert der EAL abweicht.

Der Vergleich zeigt nicht zuletzt die Güte der Uhren, die bei der Bildung von UTC zusammengefasst werden. Sie weichen von einer idealen Uhr typischerweise um weniger als 50 Milliardstel Sekunden pro Tag ab - mit anderen Worten: das Zeitintervall, binnen dessen eine dieser Uhren die 86.400 Sekunden eines Tages herunterzählt, ist um höchstens 50 Milliardstel Sekunden länger oder kürzer als 86.400 mit einer idealen Uhr heruntergezählte Sekunden. Zum Vergleich: Eine typische Quartzuhr, wie wir sie am Handgelenk tragen, geht etwa um eine Zehntel Sekunde pro Tag falsch und ist damit rund zwei Millionen mal ungenauer! Zudem ist die Abweichung bei den Atomuhren, und das ist sehr wichtig, vergleichsweise stabil: Von einem Tag zum nächsten vergrößert oder verkleinert sie sich um lediglich 2 bis 3 Milliardstel Sekunden. Uhren mit schlechteren Eigenschaften werden erst gar nicht an der offiziellen Zeitmessung beteiligt.

### Zurück zur SI-Sekunde

Das Berechnungsverfahren für EAL stellt Zuverlässigkeit und Stabilität dieser Zeitskala sicher: Uhren, deren Gang von Monat zu Monat möglichst wenig schwankt, tragen mehr zur Zeitskala bei; die Verteilung auf viele Uhren stellt sicher, dass sich die Zeitskala auch bei Ausfall einzelner Uhren nicht verändert. Damit ist aber noch nicht gewährleistet, dass die Sekunden der berechneten Zeit EAL den SI-Sekunden entsprechen, und tatsächlich gilt bei der Mittelung zumindest in dieser Hinsicht, dass viele Köche den Brei verderben: Das Mittel über die Gänge einer Vielzahl von Uhren ist zwar statistisch gesehen robust, wird aber nicht automatisch zu einer idealen Zeitskala mit SI-Sekundenmarken führen.

Abhilfe schafft eine Handvoll so genannter primärer Uhren, die so gebaut sind, dass sie innerhalb einer von den Betreibern spezifizierten Unsicherheit tatsächlich SI-Sekunden liefern. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Blick in die Atomuhrenhalle der PTB auf die dort seit mehr als zwei Jahrzehnten betriebenen primären Uhren CS1 und CS2. Sie sind die einzigen dieser Art weltweit, die wie gewöhnliche Uhren dauerhaft funktionieren. Von der Konstruktion her sind sie den kommerziell erhältlichen Uhren deutlich überlegen, und sie stellten bis 1999 die beste Annäherung an eine ideale Uhr dar (seit 1999 gibt es primäre Uhren mit lasergekühlten Atomen, die noch einmal um einen Faktor zehn genauer sind).



[Bild: PTB]

Solche Uhren werden von gegenwärtig sieben Instituten betrieben. Das ist zuwenig, um allein aus Primäruhren eine stabile, zuverlässige gemittelte Zeit zu berechnen. Stattdessen werden mehr oder weniger regelmäßig die Zeitdifferenzen dieser Primäruhren zu den "gewöhnlichen" Uhren desselben Institutes gemessen und publiziert. Das BIPM korrigiert mittels solcher Messwerte den Gang der über viele Uhren gemittelten Zeit EAL. Die so gewonnene Zeitskala heißt Internationale Atomzeit TAI (von Temps atomique international). Sie vereinigt die Vorzüge des großen Uhrennetzwerkes der EAL (Zuverlässigkeit und Stabilität) und der Primäruhren (getreue Reproduktion der SI-Sekunde).

Diese Korrekturen werden nur in ganz feinen Schritten vorgenommen, um die Stabilität der Zeitskala nicht zu beeinträchtigen. Es verbleibt daher eine zeitlich veränderliche Abweichung zwischen dem Sekundenmaß der TAI und der SI-Sekunde, die freilich nur einige wenige billionstel Promille beträgt (als <u>Zehnerpotenz</u> geschrieben: 10<sup>-15</sup>).

An dieser Stelle halten wir fest: Als ein Ergebnis dieser Operationen ist der Gang jeder der beitragenden 300 Uhren relativ zu TAI bekannt und wird vom BIPM publiziert. Folglich ist die Verfügbarkeit der Messgröße Zeitintervall (und damit auch der Messgröße Frequenz) mit sehr hoher Genauigkeit weltweit an vielen Orten gegeben. Spätestens jetzt wird es aber Zeit, den relativistischen Aspekt der Zeitfestlegung zu beleuchten, der bei den erwähnten Uhrenvergleichen eine wichtige Rolle spielt.

## Relativität und Zeitkoordinaten

"Es könnte scheinen, dass alle die Definition der 'Zeit' betreffenden Schwierigkeiten dadurch überwunden werden könnten, dass ich an Stelle der 'Zeit' die 'Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr' setze. Eine solche Definition genügt in der Tat, wenn es sich darum handelt, eine Zeit zu definieren ausschließlich an dem Ort, an welchem sich die Uhr eben befindet; die Definition genügt aber nicht mehr, sobald es sich darum handelt, an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisreihen miteinander zeitlich zu verknüpfen, oder – was auf dasselbe hinausläuft – Ereignisse zeitlich zu werten, welche in von der Uhr entfernten Orten stattfinden."

So schreibt es Albert Einstein in dem Aufsatz "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", mit dem er die Grundlagen der <u>Speziellen Relativitätstheorie</u> legte. Wir nennen die darin beschriebene "Zeit", die nur direkt am Ort der Uhr gültig ist, in moderner Sprache die Eigenzeit der betreffenden Uhr. Die Definition der Sekunde im internationalen Einheitensystem nimmt völlig zurecht keine Notiz von der Relativitätstheorie: Sie definiert die "Eigenzeit-Sekunde", und jede ideale Uhr – wie oben definiert – realisiert in ihrer Eigenzeit SI-Sekunden, unabhängig von ihrem Bewegungszustand und ihrer Aufstellung.

Hiervon zu unterscheiden ist die Zeit als vierte Koordinate eines raum-zeitlichen Bezugssystems, die immer dann definiert werden muss, wenn man ortsübergreifende Zeitangaben machen möchte. Die auf der ganzen Erde einheitlich festgelegte Weltzeit stellt eine solche Zeitkoordinate dar, und allgemeiner ist immer dann solch eine Koordinate im Spiel, wenn Zeitmessungen von Uhren, die sich an verschiedenen Orten befinden, miteinander verglichen werden sollen. Nach der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das Ergebnis solcher Vergleiche zweier baugleicher Uhren zum einen vom relativen Bewegungszustand abhängig (speziellrelativistische Zeitdehnung), zum anderen vom am Aufstellungsort herrschenden Gravitationspotential (gravitative Zeitdehnung). Dementsprechend muss man die Aufstellungsbedingungen realer Uhren

berücksichtigen, wenn man ihre Gänge sinnvoll miteinander vergleichen will.

Da Vergleiche bei der Ermittlung von EAL und TAI eine entscheidende Rolle spielen, und da die angestrebte Genauigkeit äußerst hoch ist, muss man die Relativitätstheorie angemessen berücksichtigen. Für die gravitative Zeitdehnung sagt die Allgemeine Relativitätstheorie zum Beispiel voraus, dass der Gang einer Uhr um etwa 0,01 Milliardstel Sekunden pro Tag vor geht, wenn man sie im Gravitationspotential der Erde um einen Meter anhebt. Vergleicht man (etwa mit Hilfe von Radiosignalen) zwei "ideale" Uhren, eine bei der PTB in Braunschweig auf einer Höhe von h = 80 Metern über dem Meeresspiegel und eine am amerikanischen Institut NIST in Boulder/Colorado auf einer Höhe von h = 1697Metern, dann würde die Uhr in Boulder pro Tag um 14,792 Milliardstel Sekunden gegenüber der Uhr in Braunschweig vorgehen. Ohne Kenntnis der Relativitästheorie hätte man bei einem solchen direkten Vergleich zu Recht Probleme zu entscheiden, welche der beiden Uhren denn nun als ideal zu bezeichnen sei.

Zur Festlegung der Zeitkoordinate TAI hat man daher eine räumliche Bezugsfläche ausgezeichnet, nämlich das Geoid, eine Art "mittlere Oberfläche" der Ozeane, die die Erde bedecken und der übliche Bezugspunkt für Angaben der "Höhe über dem Meeresspiegel". Der Geoid ist eine sinnvolle Bezugsfläche, da sich zeigen lässt, dass die Gleichgewichtsbedingung, aus der sich die Lage des

Wasserspiegels ergibt (aus Sicht eines mit der Erde rotierenden Beobachters: Gravitations- und Zentrifugalkraft halten sich die Waage) gleichzeitig dafür sorgt, dass die Summe der relativistischen Zeitdehnungseffekte (Zeitdehnung aufgrund der durch die Erdrotation bedingten Bewegung plus Zeitdehnung aufgrund des Gravitationsfeldes) für alle Uhren, die sich direkt auf dem Geoid befinden, denselben Wert hat.

Die Sekunde, wie sie eine Uhr direkt auf dem Geoid messen würde, wird als die Sekunde der Zeitkoordinate TAI festgelegt. Die Betreiber primärer Atomuhren ermitteln daher die Höhe h ihrer primären Uhren über dem Geoid und bringen eine entsprechende Frequenzkorrektur an, wenn die Messwerte zur Steuerung von TAI übermittelt werden. Die TAI wird damit zu einer Koordinatenzeit, deren Zeiteinheit durch ganz bestimmte Uhren definiert und durch Radiosignale an alle anderen Punkte des Raums übertragen wird. Sie stellt eine Realisation der so genannten "Temps Terrestriel" dar, der "Erdzeit" im rotierenden Bezugssystem.

# Von der Atomsekunde zur koordinierten Weltzeit

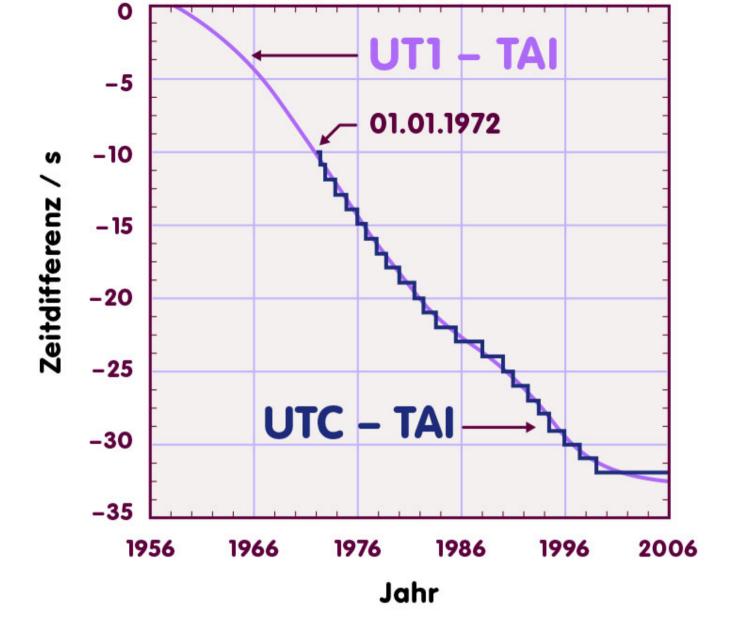
Beginnend mit der Washingtoner Konferenz von 1884, diente die mittlere Sonnenzeit am nullten Längengrad über Jahrzehnte hinweg als Referenz für das internationale Zeitsystem. Vereinfacht gesagt ist die Sonnenzeit über die Tageslänge definiert – eine Tageslänge ist das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Höchstständen der Sonne am Himmel, also zwischen zwei aufeinanderfolgenden Mittagen. Um die mittlere Sonnenzeit zu definieren, wird über ein ganzes Jahr hinweg der Mittelwert der Tageslängen gebildet. Astronomen haben diese Definition später noch verfeinert und UT1 (für "Universal Time 1", Weltzeit 1) genannt.

Allerdings zeigte es sich, dass die Periode der Erdrotation nicht konstant ist und dass sie neben einer direkt nachvollziehbaren Abbremsung in Folge der Wechselwirkung zwischen Erde und Mond noch weit größeren irregulären Schwankungen unterliegt. Nach jeder direkt aus der Erdrotation abgeleiteten Definition der Sekunde wäre diese daher einmal etwas kürzer, dann wieder etwas länger – ein für physikalische Messungen wie für technische Anwendungen untragbarer Zustand. Andererseits folgt aus der Abweichung, dass die TAI der Atomuhren mit der Zeit immer weiter von der Erdrotations-Zeit abweicht: Die per TAI definierten Mittage - die Zeitpunkte 12:00 Uhr - verschieben sich im Mittel immer weiter gegenüber dem Höchststand der Sonne.

Die koordinierte Weltzeit UTC stellt einen Kompromiss dar, der beide Nachteile vermeidet. UTC und TAI haben das gleiche Skalenmaß – eine Sekunde UTC ist genau so lang wie eine Sekunde TAI. Allerdings werden in gewissen Zeitabständen Extrasekunden eingefügt, so genannte

Schaltsekunden, und zwar gerade so, dass die Differenz zwischen UTC und der Sonnenzeit UT1 auf unter 0,9 Sekunden begrenzt ist. Die Schaltsekunden sorgen zwar dafür, dass gelegentlich ein UTC-Tag eine mehr als die üblichen 86.400 Sekunden hat. Aber wer UTC-Sekunden (oder ihre Bruchteile) abzählt, um Zeitintervalle zu messen, kann sich darauf verlassen, dass jede Sekunde zuverlässig so lang ist wie die darauf Folgende.

Das Ergebnis dieser Definition der UTC ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Sie zeigt zum einen den Unterschied zwischen TAI und der an der Erdrotation orientierten Zeit UT1, zum anderen als Treppenkurve den Unterschied zwischen TAI und der Koordinierten Weltzeit UTC:



Man erkennt, dass im Mittel über die Jahre seit 1955 die Atomsekunde um etwa 20 Milliardstel Sekunden (32,5 Sekunden in 50 Jahren) kürzer als die gemittelte Weltzeitsekunde war. In den Jahren 2004 und 2005 beispielsweise gab es Tage, an denen sich die Erde in weniger als 86.400 Atomsekunden einmal um ihre Achse drehte! Die Einführung der Schaltsekunden geschieht zum Jahreswechsel oder auch in der Mitte des Jahres als letzte Sekunde des 31. Dezembers bzw. des 30. Junis in UTC, so zum letzten Mal am Ende des Jahres 2008. Die Entscheidung hierüber trifft der International Earth Rotation and Reference Systems Service in Abhängigkeit

von der beobachteten Periode der Erdrotation. Die unregelmäßige Einführung von Schaltsekunden (entsprechend den ungleichen Abständen der Treppenstufen in obiger Abbildung) spiegelt die ungleichmäßige Drehgeschwindigkeit der Erde wieder.

Die UTC ist die Basis unseres heutigen Weltzeitsystems mit 24 Zeitzonen. Sie wird in Form von errechneten Anzeigedifferenzen mit Bezug auf die in den einzelnen Zeitinstituten X realisierten Zeitskalen UTC(X) publiziert. Daraus erklärt sich die Forderung, dass diese Skalen UTC(k) möglichst gut mit UTC - und damit auch untereinander - übereinstimmen sollen. Derzeit (Mitte 2011) gibt es weltweit 24 Zeitskalen mit einer Abweichung UTC - UTC(X) von weniger als 100 Milliardstel Sekunden, darunter die der PTB. UTC(PTB) ist die Grundlage der gesetzlichen Zeit in Deutschland und wird als solche über den Langwellensender DCF77 verbreitet (vergleiche das Vertiefungsthema Zeitbestimmung mit Radiosignalen von der Funkuhr zur Satellitennavigation). Auch in Frankreich, um ein weiteres Beispiel zu geben, ist UTC Grundlage der gesetzlichen Zeit, wohingegen Good Old England diesen Sprung in die modernen Zeiten noch nicht vollzogen hat. Dort gilt dem Gesetz nach weiterhin "Sonnenzeit", eben die berühmte Greenwich Mean Time, aber in der Praxis wird natürlich auch die Atomzeit verwendet.

Die UTC-Skala des United States Naval Observatory (USNO) wird mit den Signalen des

Satellitennavigationssystems GPS verbreitet. In Zukunft (nach 2010) wird von den Satelliten des europäischen Navigationssystems Galileo ebenfalls Zeitinformation nach UTC ausgestrahlt werden.

## Weitere Informationen

### **Kolophon**

#### **Andreas Bauch**

ist Leiter der Arbeitsgruppe "Zeitübertragung" an der <u>Physikalisch-Technischen Bundesanstalt</u> in Braunschweig. Zu Einstein Online hat er das Vertiefungsthema <u>Wie Zeit gemacht wird</u> beigetragen.

### **Zitierung**

### Zu zitieren als:

Andreas Bauch, "Wie Zeit gemacht wird" in: *Einstein Online* Band 02 (2006), 02-11022