

# Beat Jeckelmann: Zeitdefinition und moderne Zeitmessung

Die Zeitmessung hat eine für unsere Sinne unvorstellbare Genauigkeit erreicht. Wie zurzeit von Jost Bürgi sind noch heute die Navigation und die Astronomie die Hauptnutznießer der stetig verbesserten Uhrentechnik. In der Zeitmessung gilt wie auch sonst in der Messtechnik, dass ein Resultat nicht genauer sein kann als die zu Grunde liegende Einheitenrealisierung und die darauf aufbauende Messskala. Dem Stand der wissenschaftlich-technischen Entwicklung entsprechend waren die Definitionen der Zeiteinheiten und -skalen im Verlauf der letzten Jahrhunderte einem steten Wandel unterworfen.

## Zeiteinheit und Zeitskalen

Der Begriff „Zeit“ wird in den exakten Wissenschaften unterschiedlich belegt. Zum einen kann er im Sinne eines Datums, das heisst als bezeichneter Punkt auf einer gedachten Zeitachse, verwendet werden. Die Spezialisten sprechen in diesem Fall von der Epoche. Man versteht darunter aber auch die Länge eines Zeitintervalls oder – gleichbedeutend – die Dauer zwischen zwei Ereignissen. Zur Beschreibung von physikalischen Sachverhalten muss die Zeit quantifiziert und damit der Begriff des Zeitintervalls eingeführt werden. Für die Messung von Zeitintervallen braucht es eine Einheit, die im internationalen Einheitensystem (SI) Sekunde (s) genannt wird.

Ein Konzept, mit dem einzelnen Ereignissen Daten (Epochen) zugeordnet werden können, wird „Zeitskala“ genannt. Bei der Bildung einer Zeitskala werden die Intervalle ab einem festgelegten Anfangspunkt weg aufsummiert. Von einem Kalender spricht man, wenn zusätzlich Regeln für die Nummerierung der Epochen auf der Zeitskala gelten.

## Astronomische Zeitskalen (UT, UT1, UT2)

Die scheinbare Bewegung der Sonne am Himmel und der Wechsel von Tag und Nacht wird seit der Frühgeschichte der Menschheit für die Zeitbestimmung genutzt. Das Zählen der Tage, Monate und Jahre – ausgehend von einem willkürlich festgelegten Startpunkt – bildet eine natürliche Zeitskala. Das zu Grunde liegende Skalenmass ist der wahre Sonnentag, dessen Dauer durch die tägliche Beobachtung des Sonnenhöchststandes an einem fixen Standort bestimmt wird. Wegen der Neigung der Erdrotationsachse zur Bahnebene und der Elliptizität der Erdbahn ist die Länge des Tages nicht konstant, sie weicht im Verlauf des Jahres bis zu  $\pm 30$  s von der mittleren Tageslänge ab. Die über ein Jahr gemittelte Tageslänge wird mittlerer Sonnentag genannt, sie bildet das Skalenmass der Weltzeit UT (Universal Time). Die Skala ist auf den durch das Observatorium in Greenwich verlaufenden Nullmeridian bezogen und wird auch Greenwich Mean Time (GMT) genannt. Im metrischen System ist der Tag in 24 Stunden zu je 60 Minuten zu je 60 Sekunden aufgeteilt. Vor 1956 war die Sekunde entsprechend als der  $86'400$ . Teil des mittleren Sonnentages definiert. Im SI wurde diese Definition jedoch nie verbindlich festgelegt. Die Bestimmung des mittleren Sonnentages überliess man den Astronomen. In vielen Ländern basierte die gesetzliche Zeit auf der Weltzeit UT. Die lokale Zeit ergab sich aus UT durch Zuziehen oder Abziehen einer, je nach geographischer Lage des Landes, Anzahl ganzer Stunden.

Als Folge der Entwicklung von mechanischen Uhren wurde die Zeitmessung stetig genauer (Abb. 1). Die Entwicklung eines Uhrwerks mit Sekundenanzeige gelang 1585 erstmals dem Schweizer Jost Bürgi. Mit den weiteren Fortschritten wurde bald klar, dass UT nicht überall auf der Erde gleich ist. Der Grund ist eine periodische Verlagerung der Rotationsachse innerhalb des Erdkörpers. Die dadurch verursachten ortsabhängigen Fehler sind in der Weltzeitskala UT1 korrigiert. Diese

gegenüber UT viel gleichmässiger Zeitskala wurde 1956 eingeführt und ist noch heute in Gebrauch. UT1 ist wegen ihrer Beziehung zum Drehwinkel der Erde die Skala der Navigatoren.

Um 1930 war die Technik der Quarzuhren so weit fortgeschritten, dass erstmals Unregelmässigkeiten in der Erdrotationsfrequenz festgestellt wurden. Die Schwankungen weisen Perioden von einem halben und einem Jahr auf und sind auf Änderungen des Trägheitsmomentes der Erde zurückzuführen. Die relativen Schwankungen des mittleren Sonnentages betragen ca.  $10^{-8}$ . Auch diese Unregelmässigkeiten können korrigiert werden und die Folge ist eine nochmals verbesserte Zeitskala UT2.

Nebst den bereits erwähnten Effekten gibt es eine Reihe von weiteren Störungen, die Unregelmässigkeiten in der Rotationsfrequenz der Erde verursachen. Zusätzlich verlangsamt sich die Erdrotation wegen der Gezeitenreibung kontinuierlich. Untersuchungen der Jahresringe an Fossilien haben gezeigt, dass ein Jahr vor 400 Millionen Jahren ca. 400 Tage lang war. Die Rotationsfrequenz nimmt also mit ca.  $2 \times 10^{-10}$  pro Jahr ab. Dies bedeutet, dass eine auf der Erddrehung basierende Zeitskala und eine ideale Zeitskala in 100 Jahren um ungefähr 30 s auseinanderlaufen.

### **Ephemeridenzeit (ET)**

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts berechnete Simon Newcombe auf der Basis von astronomischen Beobachtungen und der Newton'schen Mechanik Tabellen mit den erwarteten Positionen der Sonne, des Mondes und einiger Planeten für die Zukunft. Tabellen dieser Art werden Ephemeriden genannt. Die Astronomen stellten nun allmählich Unterschiede zwischen den vorausberechneten und tatsächlichen Positionen fest, die nicht mit Messfehlern oder den Annäherungen in den Berechnungen erklärt werden konnten. Der Grund war, wie schliesslich die Messungen mit den neu entwickelten Quarzuhren zeigten, falsche Zeitmessungen als Folge der unregelmässigen Erdrotation. In der Folge wurde die Ephemeridenzeit eingeführt, wobei der Umlauf der Erde um die Sonne der als periodischer Vorgang für die Definition der Zeiteinheit genutzt wird. Auf Vorschlag der Astronomen definierte 1956 das Internationale Komitee für Mass und Gewicht die SI-Sekunde als einen bestimmten Bruchteil des tropischen Jahres. Das tropische Jahr ist die Zeitdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den mittleren Frühlingspunkt (Tag-Nacht-Gleiche). Die Umsetzung dieser Definition in die Praxis gestaltete sich als schwierig und das Konzept der Ephemeridensekunde wurde in der Folge recht schnell wieder fallen gelassen.

### **Atomzeit (TAI) und UTC**

Alle bisher genannten Definitionen der Sekunde hängen von den Bewegungen der Erde ab. Gegen 1950 wurden die ersten Atomuhren erfolgreich in Betrieb genommen. In Atomen können verschiedene quantisierte Zustände der Elektronen auftreten. Strahlung mit einer bestimmten Frequenz wird beim Übergang von einem Zustand zum anderen abgestrahlt. Umgekehrt kann eine Zustandsänderung in einem Atom auch von aussen angeregt werden, wenn das Atom mit der exakt zum gewählten Übergang passenden elektromagnetischen Strahlung bestrahlt wird. Diesen Mechanismus macht man sich in einer Atomuhr zu Nutze, indem ein Oszillator (z.B. ein Quarz) über einen Regelkreis genau mit der Übergangsfrequenz eines ausgewählten Übergangs im Atom abgestimmt wird. Erste Zeitskalen auf der Basis von Atomuhren wurden in den 1950er Jahren realisiert. Ein Übergang im Cäsium-Atom mit einer Frequenz im GHz-Bereich erwies sich als besonders günstig für die praktische Nutzung, so dass schliesslich dieser Übergang als Basis für eine neue Sekundendefinition gewählt wurde. Zunächst galt es die Frequenz der ausgewählten Strahlung mit der Ephemeridensekunde als Einheit zu bestimmen. Die relative Unsicherheit wurde mit  $2 \times 10^{-9}$  angegeben, was – wie wir heute wissen – etwas optimistisch war. Die 13. Generalkonferenz für Mass und Gewicht führte 1967 als neue Sekundendefinition im SI ein:

*„Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer, der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung.“*

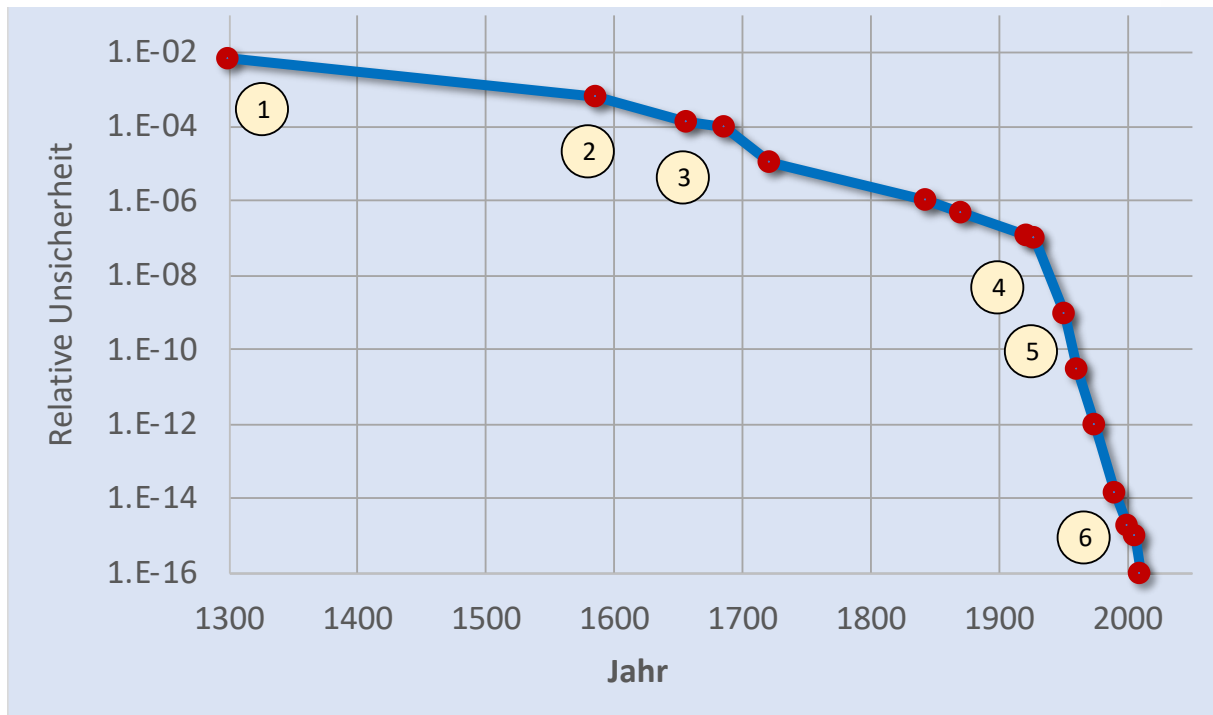
Diese Definition behält auch nach der im November 2018 beschlossenen umfassenden Revision des SI ihre Gültigkeit. Die SI-Sekunde dient als Skalenmass für die Atomzeitskala (Temps Atomique International: TAI). Heute wird TAI vom Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) aus den Daten von über 500 Cäsium-Uhren ermittelt. Die Uhren befinden sich in über 70 über die Welt verteilten Zeitlaboratorien und ihr Stand wird mit Hilfe von Satelliten ständig miteinander verglichen. Dabei trägt die Mehrzahl der Uhren zur Stabilität der Zeitskala bei. Einige ausgewählte Uhren, sogenannte Primärnormale, deren mögliche Abweichungen gegenüber der Sekundendefinition genau bekannt und korrigiert sind, definieren das Skalenmass.

Zusätzlich zu TAI braucht es eine Zeitskala, die von der Stabilität und Genauigkeit der atomar definierten Sekunde profitiert und gleichzeitig mit der astronomischen Zeitskala UT1 synchronisiert bleibt. Es wäre eher unpraktisch, wenn unsere Uhren nicht mehr im Takt mit der Sonne laufen würden. Eine Lösung wurde mit der Einführung der sogenannten koordinierten Weltzeit (Universal Time Coordinated: UTC) gefunden. UTC basiert auf der atomar definierten Sekunde wie TAI. Das Einfügen oder Weglassen von Schaltsekunden gewährleistet, dass der Unterschied zwischen UTC und UT1 genügend klein bleibt.

## **Stand der Uhrentechnik**

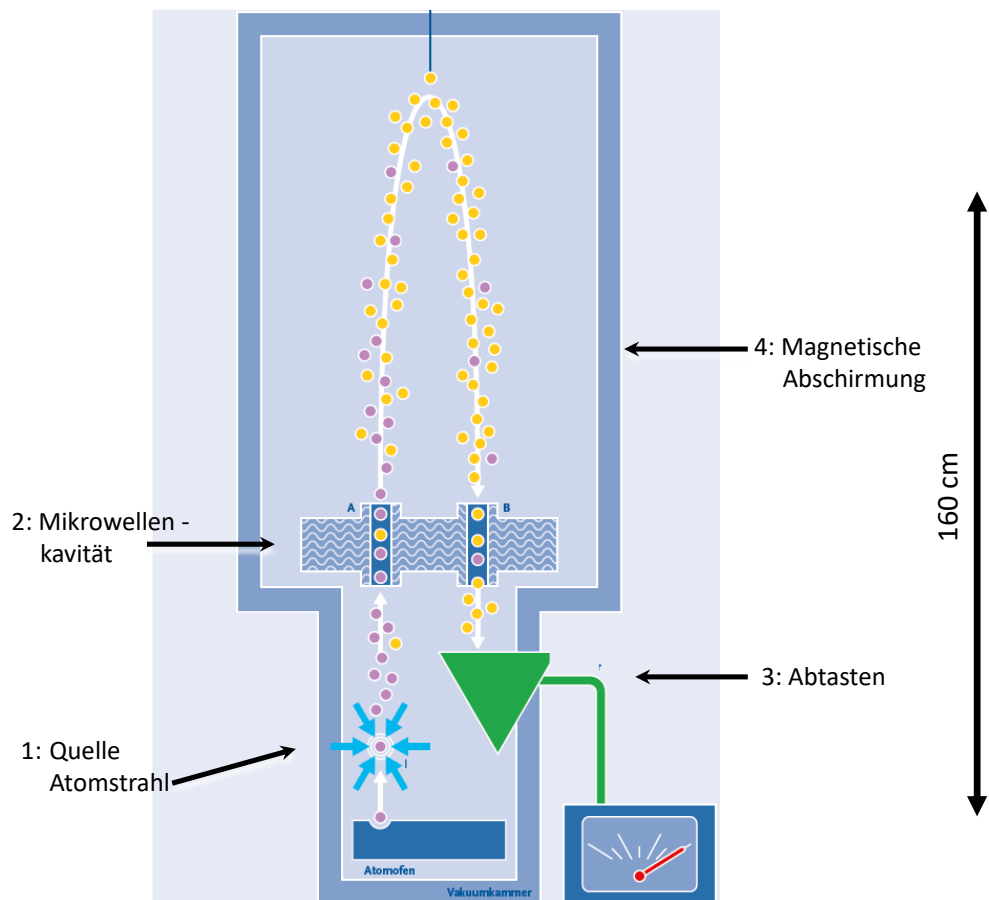
In konventionellen, thermischen Cäsium-Uhren passieren die Cäsium-Atome die Mikrowellenkavität mit einer Geschwindigkeit von ca. 300 m/sec. Dementsprechend wenig Zeit bleibt für die Abstimmung der Kavität auf die Frequenz des Atomübergangs. In neueren Normalen werden die Atome zuerst mit Laserstrahlen abgebremst, d.h. auf tiefste Temperaturen von wenigen Mikrokkelvin heruntergekühlt. Die gekühlten Cäsiumatome werden mit einem Laserimpuls paketweise etwa einen Meter angehoben; anschliessend fallen sie unter dem Einfluss des Schwerfelds der Erde wieder zurück. Auf beiden Wegen passieren die kugelförmigen Atomwölkchen den Mikrowellen-Hohlraum, wo sie insgesamt während knapp einer Sekunde angeregt werden – tausendmal länger als im Fall ungebremster Atome in der konventionellen, thermischen Cäsiumuhr (Abb. 2 und 3). Auf diese Weise kann die Sekunde mit einer relativen Messunsicherheit von unter  $10^{-15}$  realisiert werden, das entspricht einer Gangabweichung von einer Sekunde in 30 Millionen Jahren. Noch bessere Auflösung erreichen Atomuhren, die sich Atomübergänge im optischen Wellenlängenbereich zu Nutze machen (Frequenz im THz-Bereich). Eine Vielzahl von Übergängen wird zurzeit untersucht, mit dem Ziel, die bestehende Definition der Sekunde mittelfristig abzulösen.

Die Stabilität von Atomuhren ist heute derart gut, dass z.B. die allgemeine Gravitationstheorie mit grosser Genauigkeit geprüft werden kann. Ein Traum der Physiker ist eine grosse vereinheitlichte Theorie, die alle Grundkräfte der Natur vereinigt. Diese Theorien sagen in der Regel ein Versagen der untergeordneten separaten Modelle unter bestimmten Bedingungen vor. So sieht die String-Theorie eine Änderung der Feinstrukturkonstante über lange Zeiträume vor. Diese Konstante beschreibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Auch hier muss die Theorie mit den genauen Messungen der Atomuhren übereinstimmen. Die neusten Experimente ermitteln eine relative Änderung der Konstanten von weniger als  $10^{-16}$  pro Jahr, ein Wert, mit dem sich alle neuen Theorien messen müssen.



**Abb. 1 : Verbesserung der Uhrengenauigkeit im Laufe der Zeit**

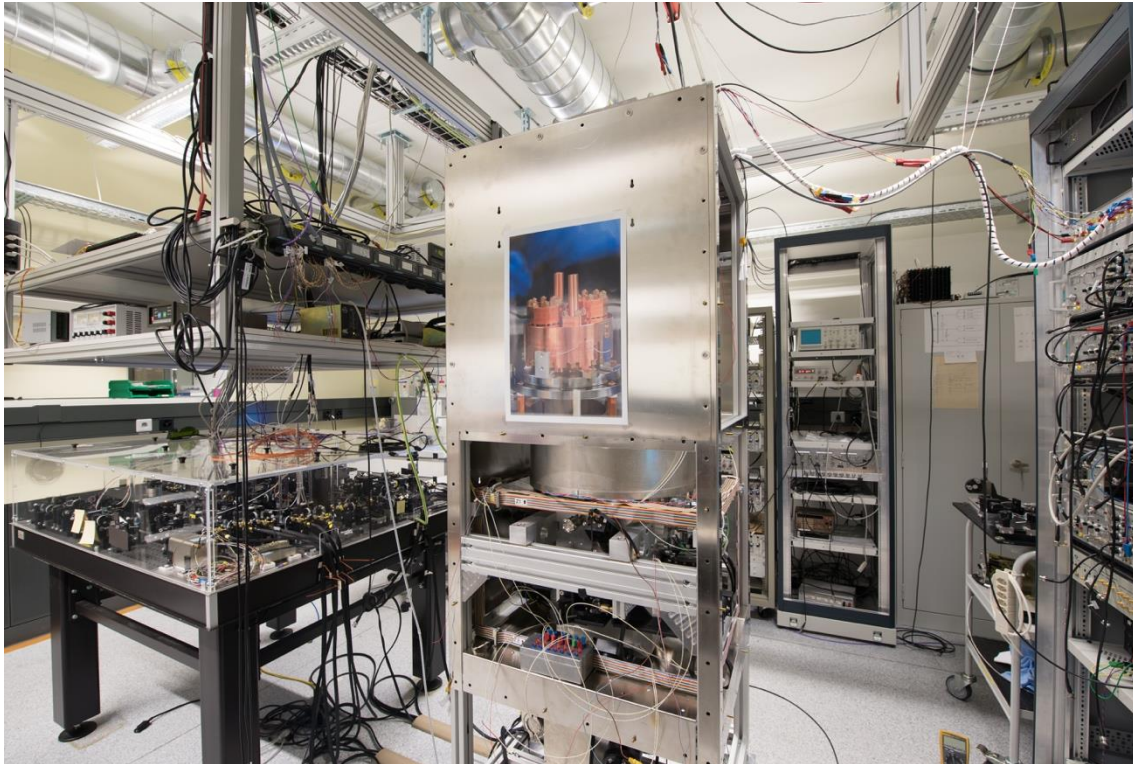
- 1) Um 1300: Mechanische Uhr mit Spindelhemmung
- 2) 1585: erste mechanische Uhr mit Sekundenanzeige von Jost Bürgi
- 3) 1656: Pendeluhr, Ch. Huygens
- 4) 1927: Quartzuhr
- 5) 1955: Cs-Atomuhr
- 6) Um 2000: Cs-Uhr mit gekühlten Atomen



**Abb. 2: FoCS-2 (Fontaine Continue Suisse), Cäsium-Uhr des METAS: Prinzipschema**

- 1) Cäsium-Atome aus dem Atomofen werden durch Laserkühlung beinahe auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt. Durch einen Laserimpuls werden die abgekühlten Atome angehoben und auf einen Parabelflug geschickt. Die Atome befinden sich im Grundzustand.
- 2) Die Atome fliegen durch die Mikrowellenkavität (A beim Flug nach oben und B auf dem Rückweg nach unten). In der Kavität kommt es zur Wechselwirkung zwischen den Atomen und der Mikrowellenstrahlung. Ist die Kavität richtig getunt, gehen die Elektronen in den angeregten Zustand über.
- 3) Der Zustand der Elektronen wird abgefragt
- 4) Die magnetische Abschirmung schützt vor externen Magnetfeldern.

FoCS-2 ist weltweit die einzige Cäsium-Uhr, die mit einem kontinuierlichen Strahl von Cäsium-Atomen funktioniert. Die übrigen Normale arbeiten im gepulsten Betrieb, wobei bei jedem Puls ein Paket von Cäsium-Atomen die Kavität zweimal in senkrechter Richtung an derselben Stelle durchläuft.



**Abb. 3: Die Cäsium-Uhr FOCS 2 am METAS**

In der Mitte sieht man die eigentliche Atomuhr mit den magnetischen Abschirmungen. Links steht der Tisch mit den Lasern und den optischen Elementen für die Vorbereitung der benötigten Laserstrahlen.