

Eine Sekunde Abweichung in 30 Millionen Jahren

Wie Zeit gemessen wird und wie wir davon profitieren

Jürg Niederhauser

Die Zeit ist die physikalische Grösse, die wir mit Abstand am genauesten bestimmen können. Die Zeitmessung hat eine für unsere Sinne unvorstellbare Genauigkeit erreicht. Diese hohe Genauigkeit ist keineswegs nur eine physikalisch-technische Spielerei. Präzise Zeitangaben haben zu können war beispielsweise für Seeleute äusserst wichtig, um den Längengrad der Position ihres Schiffes auf See bestimmen zu können. Heute nutzen wir alle in unserem Alltag hochgenaue Zeitmessungen und sind auf diese angewiesen, auch wenn das nicht direkt ersichtlich ist.

Grundsätzlich ist das Messen der Zeit etwas ganz Einfaches: «The definition of time cannot be divorced from its measurement but, fortunately, it is the simplest of all measurements. The number of repetitions of some regular event is counted from an arbitrary zero to produce a timescale. The time is a point on the scale and a time interval is the number of units between two points.»¹ Diese Aussage stammt von Louis Essen, einem britischen Physiker, der 1955 die erste funktionstüchtige Atomuhr mit Cäsiumatomen gebaut hat. Er wusste also, wovon er sprach, und er wusste auch, dass das Konstruieren eines Instruments für hochgenaue Zeitmessung alles andere als einfach war.

Die Zeitmessung braucht eine Skala

Weil uns Uhren oder der Wechsel der Jahreszeiten das Vergehen der Zeit anzeigen, haben wir die Vorstellung, dass wir die Zeit einteilen und planen können. Deutlich manifestiert sich diese Vorstellung etwa in Shakespeares Stück «Henri VI», wo sich der verzweifelte König, allein auf dem Schlachtfeld, wünscht, ein einfacher Schäfer zu sein:

O God! methinks it were a happy life, [...] to sit upon a hill, as I do now, To carve out dials quaintly, point by point, Thereby to see the minutes how they run, How many make the hour full complete; How many hours bring about the day; How many days will finish up the year; How many years a mortal man may live. When this is known, then to divide the times.²

Die Zeit kann aber nicht gleich eingeteilt werden wie andere physikalische Grössen. Sie ist anders als Länge, Winkel, Volumen, Masse oder Menge von etwas (zum Beispiel Geld). Die Zeit geht unaufhaltsam weiter, sie bleibt

1 Essen (2015), S. 5.

2 William Shakespeare, Henri VI, Teil 3, Akt 2, Szene 5.

nicht erhalten. Man kann eine «Menge an Zeit» nicht direkt mit einer anderen vergleichen, wie wir das mit zwei Längen oder dem Gewicht zweier Körper tun können.

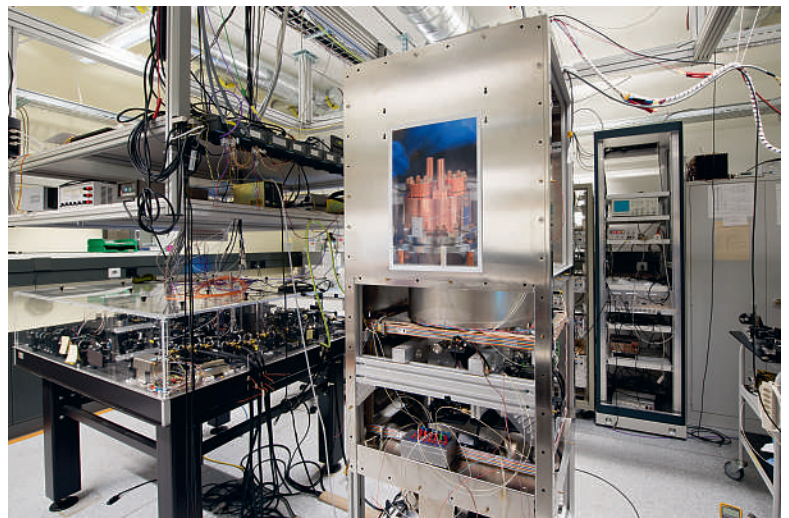
Der Begriff «Zeit» kann in der Physik einen Punkt auf einer Zeitachse bezeichnen oder die Länge eines Zeitintervalls zwischen zwei Zeitereignissen. Für das Messen eines Zeitintervalls braucht es eine Masseinheit. Im Internationalen Einheitensystem SI, der weltweit verbindlichen Basis für das Messen, ist das die Sekunde. Im Gegensatz zu anderen physikalischen Grössen braucht es, wie im Eingangszitat erwähnt, neben der Masseinheit noch eine Zeitskala. Um eine Zeitskala zu bilden, werden die Zeitintervalle von einem festgelegten Anfangspunkt an aufsummiert. Damit zwei Personen einem Zeitpunkt den gleichen Wert zuordnen, müssen der Anfangszeitpunkt ihrer Zeitskala und die Masseinheit für die Zeitintervalle übereinstimmen. Dass das nicht einfach gegeben ist, zeigen etwa die Verwendung unterschiedlicher Kalender und nicht zuletzt die heftigen Diskussionen, die in der Geschichte über die Wahl des richtigen Kalenders geführt worden sind.

Die Erde dreht sich nicht konstant genug

Ein Zeitintervall kann schon durch den Wechsel von Tag und Nacht definiert werden. Das ist ein Vorgang, der sich regelmässig wiederholt. Allerdings schwankt er im Laufe eines Jahres stark. Grundlage einer jeden Zeitmessung, der Bestimmung der Länge eines Zeitintervalls, ist, wie eingangs erwähnt, das Zählen eines sich regelmässig wiederholenden Vorgangs oder, anders ausgedrückt, einer Schwingung mit konstanter Frequenz. Je regelmässiger die Vorgänge, die gezählt werden, desto genauer kann die Zeit gemessen werden. Das können astronomische Vorgänge sein (die Umdrehung der Erde um sich selbst oder der Umlauf der Erde um die Sonne), mechanische Schwingungen (Schwingungen eines Pendels oder einer Stimmgabel, das Drehen der Räder eines Uhrwerks), elektrische Schwingungen (Schwingungen eines Quarzes) oder die elektromagnetische Strahlung eines Energieübergangs innerhalb eines Cäsiumatoms, wie das in heutigen Atomuhren der Fall ist.

Gemessen wird die Zeit schon seit Jahrtausenden. Seit der Frühgeschichte der Menschheit wurden dafür astronomische Beobachtungen genutzt: der Wechsel von Tag und Nacht, die scheinbare Bewegung der Sonne am Himmel, sichtbare Bewegungen der Sterne, die Position von Sonne, Mond und Sternen. Später stützte man sich nicht zuletzt auf die Bewegung der Erde gegenüber der

Die Fontaine Continue Suisse (FoCS), eine der weltweit genauesten Atomuhren. Sie befindet sich im Eidgenössischen Institut für Metrologie METAS in Wabern.



Résumé

Cela fait des millénaires que le temps est mesuré. À l'aube de l'humanité, on utilisait à cet effet les observations astronomiques : l'alternance du jour et de la nuit, la position du Soleil, de la Lune et des étoiles, leurs mouvements respectifs dans le ciel. Bien plus tard, on s'est appuyé notamment sur le mouvement de la Terre par rapport au Soleil, et surtout sur l'observation de la rotation de la Terre autour de son propre axe.

Depuis le premier tiers du XX^e siècle, la mesure du temps s'oriente vers le monde microscopique bien davantage que vers le monde macroscopique. L'unité fondamentale de temps, la seconde, est déterminée depuis 1967 par les propriétés de l'atome de césium et non plus par la rotation de la Terre. Le développement technologique dans le domaine de l'horlogerie de précision a fait depuis lors d'énormes progrès. La précision des horloges atomiques n'est cependant pas la seule à s'être fortement améliorée. Au cours des dix dernières années, les horloges dites « optiques » ont dépassé les horloges atomiques traditionnelles en matière de précision. Ces développements favorisent la réflexion sur une nouvelle définition de la seconde.

La mesure du temps a atteint une précision inconcevable pour nos sens. Cette extrême précision n'est en aucun cas un simple gadget physique et technique. Pour les marins par exemple, il était primordial de pouvoir disposer d'indications temporelles précises afin de pouvoir déterminer le degré de longitude de la position de leur navire en mer. Et avec le téléphone portable, objet devenu d'une grande banalité, nous avons aujourd'hui entre les mains une mesure du temps d'une précision inimaginable.

Sonne, vor allem auf die Beobachtung der Drehung der Erde um ihre eigene Achse. Die Einheit der Zeit, die Sekunde, wurde ursprünglich festgelegt als der 86 400ste Teil des mittleren Sonnentages (1 Tag = 24 Stunden zu je 60 Minuten, von denen jede wiederum aus 60 Sekunden besteht).

Die Erde dreht sich jedoch nicht so konstant, wie das für Zwecke genauer Zeitmessung wünschbar ist. Beispielsweise wirken sich die Gezeiten bremsend auf die Erdrotation aus. Das machte sich ab den 1930er-Jahren bemerkbar, als die Technik der Quarzuhren so weit entwickelt war, dass bei genauen Zeitmessungen Unregelmässigkeiten in der Erdrotation festgestellt werden konnten.

Von Himmelskörpern zu Atomen

Das bedeutete, dass man mit einer Sekunde, deren Definition von der Erdrotation abhängig war, keine Fortschritte mehr in der Genauigkeit der Zeitmessung erreichen konnte. Deshalb machte man sich auf die Suche nach einer neuen Definition für die Sekunde.

Schon im Jahre 1870 hatte der Physiker James Maxwell vor der «British Association for the Advancement of Science» dargelegt, dass makroskopische Körper wie die Erde eigentlich nur schlecht für die Definition der Masseinheiten geeignet sind. Er stellte die Forderung auf: «If then, we wish to obtain standards of length, time and mass which shall be absolutely permanent, we must seek them not in the dimensions, the motion or the mass of our planet, but in wave length, the period of vibration, and the absolute mass of these imperishable and unalterable and perfectly similar molecules.»³

In der Metrologie (Wissenschaft und Technik des Messens) hat man dieses Anliegen ernst genommen. Es ist mittlerweile bei der Definition der Masseinheiten vieler physikalischer Grössen umgesetzt. Auch in der Zeitmessung wurde man in der mikroskopischen Welt fündig. In Atomen können sich Elektronen in verschiedenen quantisierten Zuständen befinden. Beim Übergang von einem Zustand zu einem andern wird elektromagnetische Strahlung mit einer bestimmten Frequenz abgestrahlt. Umgekehrt kann von aussen eine Zustandsänderung in einem Atom angeregt werden, wenn das Atom mit der genau zum gewählten Übergang passenden elektromagnetischen Strahlung bestrahlt wird. Diesen Effekt macht man sich in einer Atomuhr zu Nutze: Über einen Regelkreis stimmt man einen Oszillator (etwa einen Quarz) genau mit der Übergangsfrequenz eines ausgewählten Übergangs in einem Atom ab. Die ersten solchen Atomuhren wurden, wie erwähnt, in den 1950er-Jahren gebaut.

Ein Übergang im Cäsiumatom mit einer Frequenz im Bereich der Mikrowellenstrahlung (im Gigahertz-Bereich) erwies sich als besonders günstig für die praktische Nutzung. Deshalb wurde schliesslich dieser Übergang als Grundlage für eine neue Definition der Einheit Sekunde gewählt. Seit 1967 wird die Einheit der Zeit, die Sekunde, durch Eigenschaften eines Atoms und nicht mehr durch die Umdrehung der Erde bestimmt. Damals wurde auf 13. «Conférence générale des poids et mesures» in Paris die folgende Definition der Sekunde beschlossen: «Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ¹³³Cs entsprechenden Strahlung.»

2019 ist eine grosse Revision des Internationalen Einheitensystems SI in Kraft getreten, die unter anderem eine neue Definition der Einheit Kilogramm mit sich gebracht hat (das Kilogramm wird nun nicht mehr durch das Urkilogramm in Paris sondern durch eine physikalische Naturkonstante, die Plancksche Konstante, definiert). Bei dieser Revision ist die Definition der Sekunde, abgesehen von einer redaktionellen Umformulierung, nicht verändert worden.

In den letzten dreissig Jahren hat die technologische Entwicklung auf dem Gebiet der Präzisionsuhren enorme Fortschritte gemacht, was die Genauigkeit dieser Uhren um mehrere Grössenordnungen verbessert hat. Es hat sich nicht nur die Genauigkeit der Atomuhren stark verbessert. In den letzten gut zehn Jahren haben sogenannte «optische Uhren» die herkömmlichen Atomuhren punkto Genauigkeit überflügelt. «Optische Uhren» sind eine neue Generation von Atomuhren, die die Frequenz von Licht nutzen. Sichtbares Licht hat eine etwa 50 000-fach höhere Frequenz als die bei Cäsium-Atomuhren verwendete Mikrowellenstrahlung. Diese Entwicklungen fördern die Überlegungen zu einer Neudefinition der Sekunde. Eine solche könnte auf der «Conférence générale des poids et mesures» von 2026 oder 2030 erreicht werden.

Die Weltzeit wird in Paris ermittelt – und in Bern mitjustiert

Mit einer hochpräzisen Atomuhr kann man Zeitintervalle messen, hat aber noch keine Zeitskala. Basis unserer Zeitskala bilden die Daten von rund 350 Atomuhren, die in über 60 Referenzlabors für Zeitmessung betrieben werden. Das Schweizer Referenzlabor wird vom Eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS) betrieben. Aus diesen Daten aus der ganzen Welt ermittelt das «Bureau international des poids et mesures» (BIPM) in Paris die Weltzeit (Universal Time Coordinated, UTC). Das ist die weltweite Referenzzeit, die für alle Zeitzonen den Takt angibt. Für die Feinjustierung der Weltzeit spielen speziell genaue Atomuhren, sogenannte Primärfrequenznormale, eine besondere Rolle. Rund ein Dutzend solcher Primärfrequenznormale auf der ganzen Welt tragen regelmässig zur Genauigkeit der Weltzeit bei. Seit Ende

3 Maxwell (1870).

2018 ist die Atomuhr «Fontaine Continue Suisse» (FoCS), die sich im METAS in Wabern bei Bern befindet, vom BIPM als Primärfrequenznormal anerkannt. Damit leistet die Schweiz einen direkten Beitrag zur Feinjustierung der Weltzeit.

ermassen indirekt eine Zeitmessung von unvorstellbarer Genauigkeit in der Hand.

Ein Zeitmessgerät von unvorstellbarer Genauigkeit in der Hosentasche

Die Zeit ist die physikalische Grösse, die wir mit Abstand am genauesten messen können. Moderne Atomuhren können die Sekunde auf 16 Stellen nach dem Komma realisieren. Die oben erwähnte Atomuhr FoCS ist so genau, dass zwei solcher Uhren in 30 Millionen Jahren um eine Sekunde voneinander abweichen würden. Solche Genauigkeitsrekorde klingen beeindruckend und werden von den Konstrukteurinnen und Betreibern stolz präsentiert. Aber was nützt es uns, die Zeit auf Bruchteile von Milliardstelsekunden genau messen zu können? Wer braucht eine solche hochgenaue Zeitmessung ausser ein paar Physikerinnen und Ingenieuren?

Hochgenaue Zeitmessmöglichkeiten sind kein Selbstzweck. Bis ins 18. Jahrhundert hinein war es ein grosses wissenschaftliches Problem, eine Methode zu finden, mit der Seeleute die Position ihres Schiffes bestimmen konnten. Erst mithilfe von Chronometern, die es erlaubten, auf einem Schiff genaue Zeitangaben zu haben, wurde es möglich, den Längengrad der Position eines Schiffes auf See hinreichend genau bestimmen zu können. Die grosse Bedeutung der Entwicklung dieses Chronometers hat die Wissenschaftsjournalistin Dava Sobel in ihrem berühmten Buch «Längengrad» sehr schön gezeigt.⁴

In unserem heutigen Alltag greifen wir immer wieder auf hochgenaue Zeitmessungen zurück und nutzen diese regelmässig. Nicht direkt, aber durch das Nutzen von Anwendungen, die darauf basieren. Datenübertragung, Mobiltelefonie, Internetkommunikation, satellitengestützte Kommunikation oder Navigationssysteme funktionieren nur dank hochgenauer Zeitmessungen.

Führt man sich vor Augen, dass ein Meter der Distanz entspricht, die das Licht in 3,3 Nanosekunden (3,3 Milliardstelsekunden) zurücklegt, wird ersichtlich, dass Navigationssysteme wie GPS auf hochgenaue Zeitmessungen angewiesen sind. Ein Messmittel muss mindestens um eine Grössenordnung genauer sein als das zu Messende. Das heisst, schon um mit einem Navigationssystem auf einen Meter genau vermessen zu können, ist man auf eine Zeitmessung in der Genauigkeit von einem Zehntel oder einem Hundertstel einer Milliardstelsekunde angewiesen. Heutzutage kann man mit GPS-Empfängern auf einen halben Millimeter genau vermessen. Mit einem alltäglich gewordenen Gegenstand wie einem Mobiltelefon halten wir also gewiss-

Literatur

- Essen, Ray (2015): The Birth of Atomic Time, Peterborough.
- Maxwell, James Clerk (1870): Report of the fortieth meeting of the British Association for the Advancement of Science, Section A Mathematical und Physical science, S. 215–219.
- METAS (2019): Das Internationale Einheitensystem SI, Wabern.
- Sobel, Dava (1996): Längengrad. Die wahre Geschichte eines einsamen Genies, welches das grösste wissenschaftliche Problem seiner Zeit löste. Berlin Originaltitel: Longitude, New York, 1995].

DOI

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6360730>

Zum Autor

Jürg Niederhauser hat germanistische Linguistik und Physik studiert und über Popularisierung von Wissenschaft promoviert. Er hat an verschiedenen Schweizer Universitäten gearbeitet und daneben auch journalistisch publiziert. Nach einer Tätigkeit in einem medizintechnischen Unternehmen arbeitet er beim Eidgenössischen Institut für Metrologie METAS, dem Kompetenzzentrum des Bundes für alle Fragen des Messens, für Messmittel und Messverfahren.



4 Sobel (1996).