
Optik und Astronomie zur Messung der Zeit

Wolf-Dieter Prenzel

Die Messung der Zeit umfasst die „Methodik und die Messgeräte, mit deren Hilfe die absolute Zeit bestimmt, sowie die Dauer eines bestimmten Vorgangs gemessen wird. Zeitmesser bezeichnet man allgemein als Uhren“ [1]. Ursprüngliche Grundlage der Zeitmessung war die Drehung der Erde. Die Bestimmung der Uhrzeit beruhte auf Beobachtung der Sonne und der Sterne. Spätere Uhren können als mechanische Modelle bzw. als Nachahmung der relativen Bewegungen von Erde, Sonne und Sternen verstanden werden. Mit mechanischen Konstruktionen wurde versucht, mit immer größerer Genauigkeit zu diesen in Einklang zu kommen. Im geschichtlichen Rückblick betrachtet, nutzten Uhren eine Vielzahl von Energiequellen: Sonne, Wasser, Schwerkraft, Elektrizität und die Kraft des Atoms. Licht und optische Instrumente waren dabei von Beginn an bis heute von wesentlicher Bedeutung.

Zeitmessgeräte - Von der Minute zur Sekunde

Die Geschichte der Zeitmessgeräte lässt sich bis ins Altertum zu den Sumerern und Ägyptern zurückverfolgen. Sonnenuhren mit einfachen Schattenstäben wurden nachweislich bereits um 3000 v.Chr. verwendet. Ursprünglich wurde der Tag dabei stets in 12 Stunden unterteilt. D.h. eine Stunde war im Sommer länger als im Winter. Spätere ägyptische Schattenuhren waren tagsüber in zehn Teile mit zusätzlichen je zwei morgendlichen und abendlichen Dämmerungsstunden versehen.

Von den Babyloniern wurde um 2000 v.Chr. das Sexagesimalsystem mit der Basiszahl 60 verwendet. Des Weiteren verwendeten die Ägypter als Schatter große Obelisken, mit deren Hilfe sie die Sommer- und Wintersonnenwende feststellen und den Meridian

entdecken konnten. Aufgrund des ungleichmäßigen Laufs der Sonne kommt es zu Abweichungen der gemessenen zur wahren Sonnenzeit bis zu ± 15 min. Die mit einer gewöhnlichen Sonnenuhr gemessene Zeit unterscheidet sich für verschiedene Orte mit anderen geographischen Längengraden. Sonnenuhren mit Zeitgleichungskorrektur sind aufgrund ihrer aufwändigeren Konstruktion selten. Die mögliche Grenzgenauigkeit liegt bei 2 min. Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts dienten Sonnenuhren als sogenannte Mittagsweiser zum Justieren der zu dieser Zeit noch ungenaueren mechanischen Uhren. Das gilt bis heute: Sonnenuhren sind die einzigen Zeitmessgeräte, welche die Drehung der Erde direkt zählen. Durch sie wurde die Tageslänge und daraus abgeleitet auch als Grundeinheit die Länge der Sekunde (86.400ter Teil eines Tages) festgelegt. Der Versuch, diese „irdische“ Sekundenlänge durch das Zählen anderer periodischer Abläufe möglichst genau zu erreichen führte zur langen Geschichte weiterer Zeitmesser, also der Uhrentechnik.

Bereits ab etwa 1500 v.Chr. gab es erste Wasseruhren, mit denen konstante Zeiteinheiten durch das Strömen einer Menge Wasser von einem Behältnis in ein anderes ermittelt wurden. Es wurden Einlauf- und Auslaufuhren unterschieden. Im Laufe der Jahrhunderte kam es zu teils komplizierten und aufwändig konstruierten Wasseruhren. Einige der eindrucksvollsten Wasseruhren wurden von muslimischen Ingenieuren entwickelt. Bekannt wurden insbesondere die Konstruktionen von Al-Jazari um 1200 n.Chr. Mit seiner sogenannten Elefantenuhr konnte die Fließgeschwindigkeit des Wassers verändert werden, d.h. sie konnte auf ungleiche Tageslängen über das Jahr eingestellt werden. Die Elefantenuhr war die erste Uhr mit einem Automatismus, der nach einer bestimmten Zeit erneut ablief. Die Ganggenauigkeit der Wasseruhren lag bei etwa 15 min am Tag. [2]



Bild 1. Moderne Wasseruhr im Europa Center Berlin

Der chinesische Mathematiker und Ingenieur Han Kung-Lien baute bereits 1088 n.Chr. eine Wasseruhr mit Hemmung. In einem Holzgestell war ein Rad mit Schöpfkammern eingebaut, die alle 24 Sekunden mit Wasser gefüllt wurden. Durch das Gewicht des vollen Wasserschöpfers wurde ein Auslöser heruntergedrückt, der an einer Kette zog. Die Hemmung wurde so gelöst und das Rad konnte um eine Kerbe weiterrücken. Das Prinzip der mechanischen Hemmung wurde in Europa erst ab 1300 in den mechanischen Räderuhren verwirklicht.

Diese wurden meist als öffentliche Uhren an Kirchen oder Rathäusern gebaut, oft auch als Kunstuhren und mit einer Vielzahl an astronomischen Indikationen versehen. Ab dem 13. Jahrhundert wurden mechanische Uhren mit einer Spindelhemmung zum Standard-Zeitmessgerät.

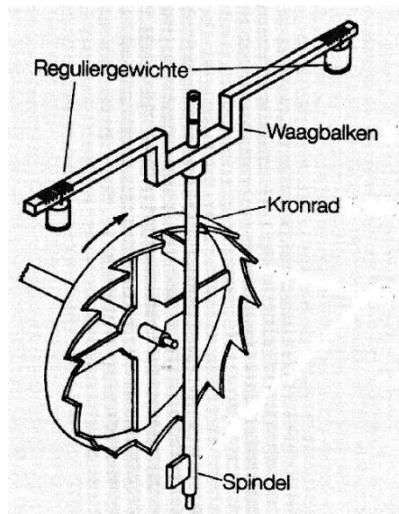


Bild 2. Spindel-Waag-Hemmung, Zeichnung des Astrariums* von Giovanni de Dondi (1364), *auch Planetarium: mechanische Darstellung der zyklischen Natur astronomischer Abläufe mit einem Zeitmessgerät

Zunehmend wurden auch relativ einfach aufgebaute und kleinere Räderuhren gebaut, die schnell eine weite Verbreitung fanden. Ab etwa 1450 wurden erste Räderuhren mit einem Federantrieb ausgestattet. Dem Nürnberger Schlossermeister und Uhrmacher Peter Henlein wird auch die Erfindung erster tragbarer Uhren zugeschrieben (1510), angetrieben mit einer spiralförmig aufgewundenen Zugfeder. 1583 entdeckte Galileo Galilei den Isochronismus, die Grundvoraussetzung für die Erfindung des Uhrenpendels um 1650 durch Christiaan Huygens. Die Anfertigung wirklich tragbarer Uhren und damit die Entwicklung der Räderuhr zur Taschenuhr, wird aber erst mit der Erfindung der Unruh, um 1674 ebenfalls durch Huygens, möglich. Mit der Entwicklung der Pendeluhr konnten innerhalb weniger Jahrzehnte die Gangabweichungen drastisch reduziert werden. Mitte des 18. Jahrhunderts liefen diese Uhren dauerhaft konstant und erreichten Gangabweichungen von einigen Sekunden am Tag. Dieser Meilenstein der Uhrmacherei ermöglichte die Einführung des

Minutenzeigers (der bis dato völlig überflüssig gewesen war) und eröffnete das Zeitalter der modernen Großuhren. Die „Unruh“ verhalf Huygens später dazu, sein Prinzip auch auf kleinere Uhren zu übertragen. Eine Spiralfeder ersetzte dabei die herkömmlichen Gangregler, sorgte für Eigenschwingung und verringerte Ungleichmäßigkeiten.

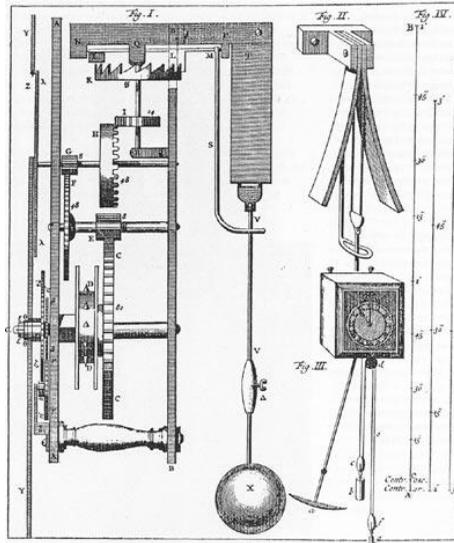


Bild 3. Pendeluhr von Christiaan Huygens

War der Uhrenbau bisher eine Sache der Mechaniker, so begann im 17. Jahrhundert die Theoretisierung der Mechanik zur Wissenschaft. „Auch wenn das eigentliche Handwerk des Uhrenbaus die Domäne der Mechaniker blieb, so übten die Wissenschaftler, insbesondere die Astronomen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die weitere Entwicklung der Uhrentechnik aus, sei es mit neuartigen wissenschaftlichen Erkenntnissen oder als Auftraggeber für Präzisionsinstrumente“[3].

Durch die Erfindung der Ankerhemmung im Jahr 1670 wurde erst die Entwicklung der modernen Pendeluhr ermöglicht. Die

vorherigen Langpendeluhren hatten die Spindelhemmung verwendet, was einen sehr großen Pendelausschlag erforderte. Um diesen großen Pendelausschlag zu verringern, verwendeten die meisten Pendeluhren mit Spindelhemmung ein kurzes Pendel. Diese hatten jedoch den Nachteil einer ungenauen Zeitmessung, erforderten mehr Bewegungsenergie und verursachten mehr Friktion und Abnutzung als die Langpendel. Durch die Verwendung der Ankerhemmung konnte der Pendelausschlag soweit verringert werden, dass wieder Langpendel verwendet werden konnte. Die meisten Pendeluhren waren so gebaut, dass die Pendel auf ein Zeitintervall von einer Sekunde pro Pendelschwingung abgestimmt waren, wodurch die Länge des Pendels etwa einen Meter betrug. Bedingt durch die Pendellänge und den langen Fallraum der Antriebsgewichte mussten hohe und schmale Pendeluhren hergestellt werden.

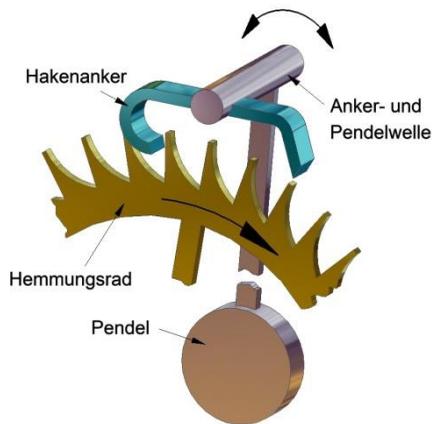


Bild 4. Funktionsprinzip einer Hakenhemmung (Quelle: Wikipedia/Unruh/Uhr)

Eine weitere technische Verfeinerung brachte die im Jahre 1676 von dem englischen Philosophen Robert Hooke erdachte rückführende Hakenhemmung, die besonders bei Standuhren verwendet worden ist. Diese Erfindung ermöglichte Christiaan Huygens, in die Gangregler der herkömmlichen Uhren eine Spiralfeder (Unruh) einzufügen, durch die sie eigenschwingungsfähig wurden. Damit konnten die Störungen durch den ungleichmäßigen Antrieb und

durch äußere Einwirkungen bei dem Tragen der Taschenuhren verringert werden, gleichzeitig wurde ein großer Fortschritt in der Genauigkeit der Taschenuhren erreicht. Huygens' Beiträge zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Zeitmessern waren die entscheidende Voraussetzung für die serienmäßige Herstellung von Uhren. [2]

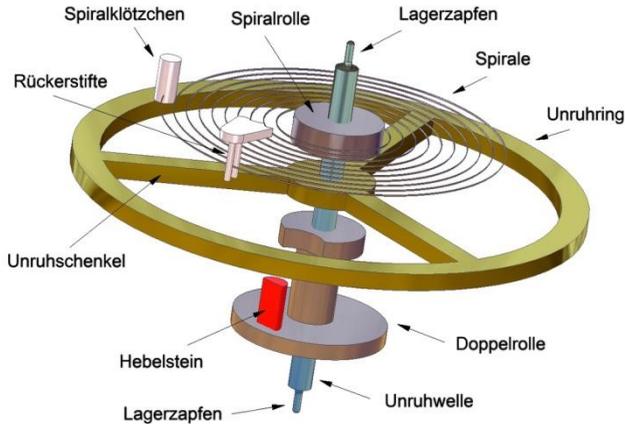


Bild 5. Funktionsprinzip eines Unruh-Spiral-Schwingsystems (Quelle: Wikipedia/Unruh /Uhr)

Die Genauigkeit der Zeitbestimmung erreichte mit Sekundenpendeln bereits im 18. Jahrhundert die Zehntelsekunde, was die Konstruktion temperaturkompensierter Pendelstangen anregte. Das um 1880 entwickelte Riefler-Pendel verbesserte die Zeitsysteme der Sternwarten noch weiter in den Bereich einiger 0,01 Sekunden und 1921 die Shortt-Uhr in die Millisekunden. Diese Präzisionspendeluhren dienten auch bis etwa 1960 als Basis für Zeitdienste.

Optische Instrumente zur astronomischen Zeitbestimmung

Die im Laufe des 18. Jahrhunderts erreichte Genauigkeit des Uhrenbaus setzte noch immer die astronomische Referenz voraus. Selbst die Ganggenauigkeit hochpräziser Pendeluhr im 19. Jahrhundert erforderte zur Kontrolle eine möglichst tägliche astronomische Zeitbestimmung. Neben der Zeitbestimmung mit Sonnenuhren fanden optische Instrumente weite Verbreitung. Abgesehen von den aus der Steinzeit bekannten Sternbeobachtungsplätzen (z.B. Stonehenge) entstanden die ersten Sternwarten im heutigen Sinne in der Zeit nach der Erfindung des Teleskops Anfang des 17. Jahrhunderts. Die zweite historisch bedeutsame Sternwarte der Welt wurde 1666 in Greenwich eingeweiht und nahm 1676 den Betrieb zur Beobachtung der Meridiane auf. Die von John Flamsteed benutzte Apparatur war ein frühes sogenanntes Passageinstrument (auch Durchgangsinstrument oder Mittagsrohr). Wichtigster Teil des Instruments ist ein auf waagerechter Achse montiertes Fernrohr. Es ist vertikal nur in einer Richtung schwenkbar. Exakt in Nord-Süd-Richtung aufgestellt sind nur im Meridian Beobachtungen möglich. Die genaue Sonnenuhrzeit, der wahre Mittag wird im Meridiandurchgang der Kulmination der Sonne festgestellt.



Bild 6. Passageinstrument (Quelle: H.Raab, Kuffner-Sternwarte, Wien)

Zur genauen Zeitbestimmung können die Meridiandurchgänge von Sternen beobachtet und mit Hilfe eines parallel ausgerichteten Fadennetzes gemessen werden. Zur Genauigkeitssteigerung wurden auch optische Mikrometer verwendet. Die Messgenauigkeit liegt bei etwa $0,1''$, die Zeitbestimmung ist visuell genauer als 0,02 Sekunden. Die Ganggenauigkeit präziser Pendeluhrn musste möglichst täglich durch eine astronomische Zeitbestimmung kontrolliert werden. Mit zunehmender Verbreitung des Uhrenbaues entstand bei den Uhrmachern ein Bedarf an möglichst einfachen Instrumenten für eine genügend genaue Zeitbestimmung. Als einfaches Passageinstrument fand so das vom königlichen Chronometerfabrikanten Edward John Dent 1843 patentierte Diploidoskop eine weite Verbreitung. [4]



Bild 7. Diploidoscope von E.J.Dent & Co. (Quelle: Royal Museums Greenwich)

Die Genauigkeit der Zeitbestimmung liegt bei 1 bis 2 Sekunden und kann bei Benutzung einer Fernrohroptik bis 0,5 Sekunden betragen, also mindestens eine 10fach höhere Genauigkeit als bei Benutzung einer Sonnenuhr. Nachteilig wurden jedoch die erforderliche exakte Ausrichtung und die damit verbundene Erprobungszeit empfunden. Prof. Carl August Steinheil veröffentlichte 1845 die Konstruktion eines Passage-Prismas, mit dem trotz einfachem Gebrauch ebenfalls Genauigkeiten unter einer Sekunde erzielt werden konnten. [5]



Bild 8. Passageprisma (Quelle: Deutsches Museum, München)

Bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts erreichten mechanische Uhren Ganggenauigkeiten, denen die jeweils eigene Zeitbestimmung der Uhrenhersteller nicht mehr gerecht werden konnte. Die von Observatorien ermittelte Zeit war durch Übertragung von Zeitzeichen inzwischen allgemein verfügbar geworden.

Feinmechanische Meisterwerke mit Gangungenauigkeiten von wenigen Millisekunden pro Tag zeigten zugleich die Grenzen der Leistungsfähigkeit im Uhrenbau auf.

Immer genauer: Physik vs. Astronomie

Aufgrund der erreichten Genauigkeiten wurden Anfang des 20. Jahrhunderts auch Abweichungen zur astronomisch gewonnenen Zeit offenbar, deren Ursachen nicht nachzuweisen waren. Erst 1932 konnte von den deutschen Physikern Adolf Scheibe und Udo Adelsberger eine Quarzuhr entwickelt, mit der wöchentliche Schwankungsraten der Erdumdrehung gemessen werden konnten. Eine Quarzuhr ist eine elektromechanische oder vollelektronische Uhr, deren Taktgeber ein elektronischer Uhrenquarz ist. Schwingquarze sind zu elektromechanischen Resonanzschwingungen fähige Bauelemente, Quarz-Piezo-Kristalle schwingen mit bis zu 33000 Hz. Sie halten ihre Nennfrequenz innerhalb sehr kleiner relativer Fehlergrenzen (etwa 200 Mikrosekunden pro Tag) ein und eignen sich daher als recht genaue Taktgeber in Uhren. Die Entdeckung der unregelmäßigen Erddrehung durch eine Uhr revolutionierte die Zeitmessung zugunsten der Physik. Die Antwort der Astronomie führte zur zuverlässigeren Zeitbestimmung durch Beobachtung des Umlaufs der Planeten um die Sonne anstelle des Umlaufs des Planeten Erde um sich selbst. War bis in die 50iger Jahre des 20. Jahrhunderts die Sekunde als der 86.400ste Teil eines mittleren Tages (eine Drehung der Erde um sich selbst) definiert, so galt ab 1960 als neue Basiseinheit der Sekunde der 31.556.925,9747te Teil des tropischen Jahres am 31. Dezember 1899 um 12 Uhr Ephemeriden-Zeit. Die Sekunde beruhte damit auf der Länge des als Referenz gewählten Jahres 1900 und entsprach der Zeitspanne, welche die Erde für ihren Umlauf um die Sonne benötigt, bezogen auf den Fixsternhimmel.

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wurde versucht, die periodischen Vorgänge im Innern von Molekülen und Atomen zur Ermittlung der Zeitbestimmung zu nutzen. Harald Lyon baute 1949 die erste Atomuhr der Welt in den USA. Eine Atomuhr ist eine Uhr, deren Zeittakt aus der charakteristischen Frequenz von Strahlungsübergängen der Elektronen freier Atome abgeleitet wird. In Atomuhren macht man sich die Eigenschaft von Atomen zu Nutze, beim Übergang zwischen zwei Energiezuständen elektromagnetische Wellen einer bestimmten Frequenz abzustrahlen oder zu absorbieren.

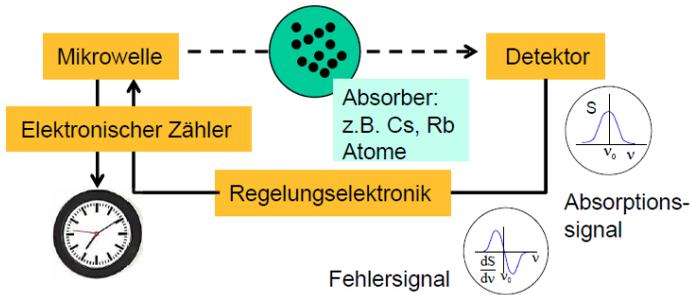


Bild 9. Schema des Aufbaus der „klassischen“ Atomuhr [6]

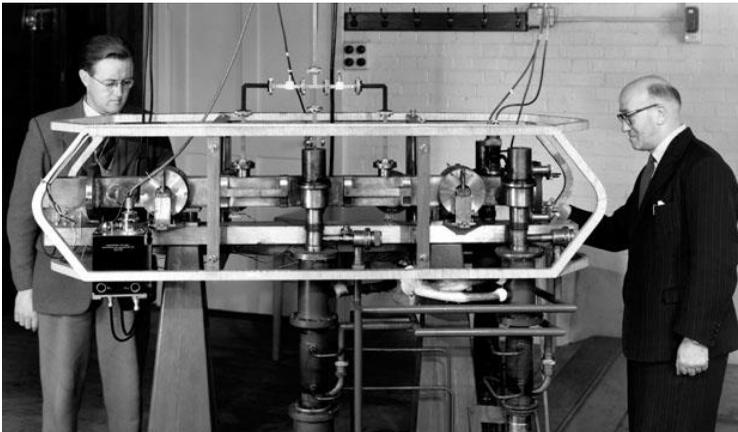


Bild 10. Cäsium-Atomuhr von Louis Essen und J.V.L.Parry 1955
(Quelle: National Physikal Laboratory, U.K.)

Aufgrund ihrer überragenden Gangeigenschaften wurde die Atomzeit 1967 als internationaler Standard für die Sekunde definiert. Damit gilt bis heute: 1 Sekunde ist das 9.192631.770-fache der

Perioden-Dauer des Grundzustandes von Atomen der dem Cäsium-Nuklid entsprechenden Strahlung.

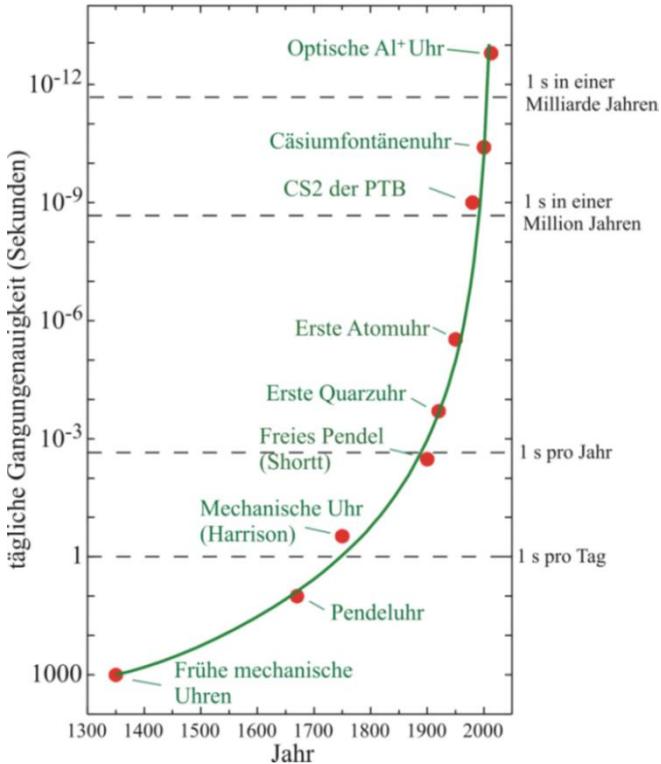


Bild 11. Entwicklung der Genauigkeit von Uhren (Quelle: PTB Braunschweig)

Vergleich der Periodendauer des Uhrenpendels (Frequenz = $1/\text{Periodendauer}$):

- Mechanisches Pendel 1 s
- Quarz $0.000\,001\,s$
- Cäsium Atomuhr $0.000\,000\,000\,11\,s$
- Optische Atomuhr $0.000\,000\,000\,000\,002\,s$

Optische Uhren

Während Atomuhren bislang auf der Messung der Frequenz einer atomaren Resonanz basiert, verwenden optische Uhren die Frequenz von Licht, denn sichtbares Licht hat eine etwa 50.000-fach höhere Frequenz als die beim Caesium genutzte Mikrowellenstrahlung. Das Ziel ist dabei, eine noch höhere messbare Ganggenauigkeit mit einer Atomuhr zu erzielen, die mit einer optischen Resonanz arbeitet. Hieran wird bereits seit einigen Jahren geforscht.

Diesem Ziel nähern sich Forscher mit Experimenten an Elementen, die geeignete Übergänge bei optischen Wellenlängen haben. Auf diesem Weg werden Frequenzen von hunderten TeraHz erreicht, die deutlich über den herkömmlichen 9 GHz liegen. Ein Laser wird auf einen schmalbandigen Übergang stabilisiert und einzelne Atome in einer Atomfalle gespeichert. Nachfolgend wird die Stabilität der Frequenz dieses Laserlichts ohne Genauigkeitsverlust mit einem Frequenzkamm auf ein periodisches elektrisches Signal übertragen. Taktgeber der Uhr soll nicht eine Übergangsfrequenz zwischen zwei Zuständen in der Elektronenhülle sein, wie es bei allen heutigen Atomuhren der Fall ist, sondern eine Übergangsfrequenz im Atomkern. Die Protonen und Neutronen im Atomkern sind um viele Größenordnungen dichter gepackt und fester gebunden als die Elektronen in der Atomhülle und reagieren damit weniger empfindlich auf äußere Störungen, die ihre Übergangsfrequenzen ändern könnten; gute Bedingungen also für eine Uhr von hoher Genauigkeit.

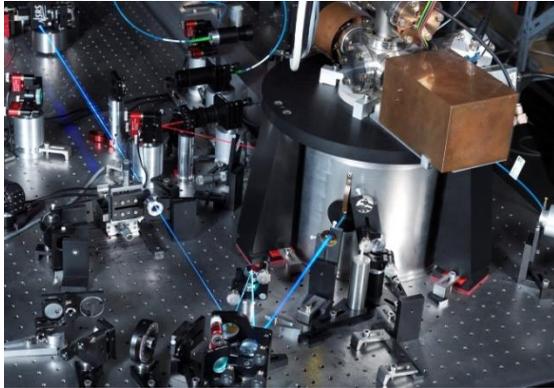


Bild 12. Versuchsaufbau einer optischen Uhr: Optische und präzisionsmechanische Komponenten werden zur Stabilisierung von Laserfrequenzen benötigt (Quelle: PTB Braunschweig)

Wozu braucht man zukünftig immer noch genauere Uhren? Einige Beispiele für deren Nutzung sind

- Kontrolle und Referenz für primäre Cs-Atomuhren
- Verbesserung der Satellitennavigation und -positionierung
- Hochgenaue Verfolgung von Raumsonden
- Astronomische Beobachtungen, z.B. Bestimmung der Periodendauer von Pulsaren
- Experimente zu den Grundlagen der Physik, z.B. Messung von Naturkonstanten und Tests der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie.

Auch eine zukünftige relativistische Geodäsie wird von Uhren mit Genauigkeiten im Attosekundenbereich profitieren. Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt, dass der relative Frequenzunterschied $\Delta\nu/\nu$ von Uhren, die sich auf verschiedener Höhe befinden, von der Höhendifferenz h abhängig ist:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c}$$

g Schwerebeschleunigung, (9,81 m/s²)

c Lichtgeschwindigkeit (299 792 458 m/s).

Eine Höhendifferenz von 1 Meter verursacht damit eine relative Frequenzverschiebung $\Delta\nu/\nu$ von etwa $1 \cdot 10^{-16}$. Diese Tatsache wurde schon bei Tests der Relativitätstheorie ausgenutzt (Experimente zur Rotverschiebung). Beispielweise ergibt eine Höhendifferenz von etwa 1600 m (zwischen PTB, Braunschweig und NIST, Boulder, USA) eine relative Frequenzverschiebung von etwa $1,8 \cdot 10^{-13}$. Der Vergleich der Frequenz der genauen Uhren in diesen zwei metrologischen Institutionen bestätigt die Gültigkeit der Theorie.

Uhren, die auf 10^{-17} bis 10^{-18} genau wären, könnten zukünftig Potentialunterschiede „aufspüren“, die Höhenunterschieden im cm-Bereich entsprechen, d.h. damit könnte man die Erde und ihr Gravitationsfeld sehr genau vermessen. [6]

Quellenverzeichnis

[1] Wikipedia/Zeitmessung

[2] Wikipedia/Geschichte der Zeitmessgeräte

[3] J. Graf, Die zweite Teilung der Stunde, PTB-Mitteilungen 127 (2017), Heft 3

[4] H. Dittrich, Die Messung des Augenblicks, Sandstein-Verlag 2008

[5] Prof. Steinheil, Über Beobachtungsmittel zur Erkundung des Ganges der Uhren, insbesondere über das Prinzip des Passageprismas, Kunst-und Gewerbeblatt 1846

[6] Optische Atomuhren, PTB-Präsentation, G. Grosche 2012