

Zeitmessung damals, 1472 und heute

Prof. Dr. Fedor Mitschke
Universität Rostock
Institut für Physik



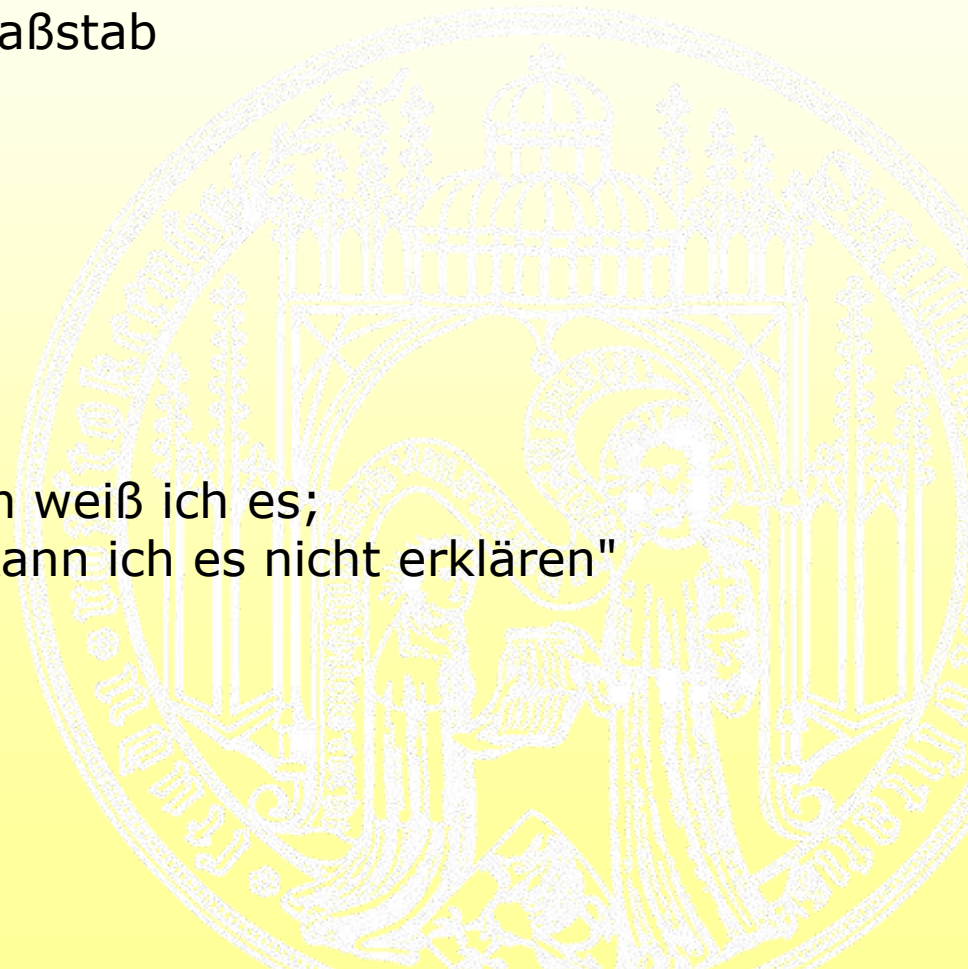
Zeit — Messung

- Was ist eine *Messung*?

Vergleich mit einem Referenzmaßstab

- Was ist *Zeit*?

"Wenn mich niemand fragt, dann weiß ich es;
sobald ich aber gefragt werde, kann ich es nicht erklären"
(Augustinus)



Zeitskalen:

Unsere Welt erstreckt sich
von 10^{18} s (1 000 000 000 000 000 000 s)
bis 10^{-35} s (0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01 s)


... das sind 53 Zehnerpotenzen



Der Mensch erlebt davon
nur 11 Zehnerpotenzen

10^{18} s		Alter des Universums $0,4 \cdot 10^{18}$
10^{17} s		Alter der Erde
10^{16} s		
10^{15} s	1 Ps	Lebensdauer Gebirgsketten
10^{14} s		
10^{13} s		
10^{12} s	1 Ts	Halbwertszeit Plutonium-239
10^{11} s		Lebensdauer der langlebigsten Bäume
10^{10} s		
10^9 s	1 Gs	Lebensdauer Mensch 3 Gs
10^8 s		
10^7 s		Umlauf der Erde um die Sonne (Jahr)
10^6 s	1 Ms	Umdrehung der Erde (Tag)
10^5 s		
10^4 s		
10^3 s	1 ks	Halbwertszeit eines freien Neutrons
10^2 s		
10^1 s		
10^0 s	1 s	menschlicher Herzschlag
10^{-1} s		
10^{-2} s		
10^{-3} s	1 ms	
10^{-4} s		Fotoblit; Schwingungsdauer der höchsten Töne
10^{-5} s		
10^{-6} s	1 μ s	Halbwertszeit eines Myons
10^{-7} s		
10^{-8} s		
10^{-9} s	1 ns	
10^{-10} s		Schwingungsperiode bei Mikrowelle
10^{-11} s		
10^{-12} s	1 ps	
10^{-13} s		
10^{-14} s		schnellste chemische Reaktionen
10^{-15} s	1 fs	Schwingungsdauer sichtbares Licht; kürzeste Laserpulse
10^{-16} s		
10^{-17} s		
10^{-18} s	1 as	
10^{-19} s		

Zeitskalen:

Unsere Welt erstreckt sich
von 10^{18} s (1 000 000 000 000 000 000 s) 
bis 10^{-35} s (0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01 s)

... das sind 53 Zehnerpotenzen

Der Mensch erlebt davon
nur 11 Zehnerpotenzen

10^9 s	1 Gs	Lebensdauer Mensch 3 Gs
10^8 s		
10^7 s		Umlauf der Erde um die Sonne (Jahr)
10^6 s	1 Ms	
10^5 s		Umdrehung der Erde (Tag)
10^4 s		
10^3 s	1 ks	Halbwertszeit eines freien Neutrons
10^2 s		
10^1 s		
10^0 s	1 s	menschlicher Herzschlag
10^{-1} s		
10^{-2} s		
10^{-3} s	1 ms	
10^{-4} s		Fotoblitzz; Schwingungsdauer der höchsten Töne
10^{-5} s		
10^{-6} s	1 μ s	Halbwertszeit eines Myons
10^{-7} s		
10^{-8} s		
10^{-9} s	1 ns	
10^{-10} s		Schwingungsperiode bei Mikrowelle
10^{-11} s		
10^{-12} s	1 ps	
10^{-13} s		
10^{-14} s		schnellste chemische Reaktionen
10^{-15} s	1 fs	Schwingungsdauer sichtbares Licht; kürzeste Laserpulse
10^{-16} s		
10^{-17} s		
10^{-18} s	1 as	
10^{-19} s		
10^{-20} s		
10^{-21} s		
10^{-22} s		
10^{-23} s		Licht durchquert Atomkern
10^{-24} s		
\vdots		
10^{-34} s		
10^{-35} s		Planck-Zeit: Licht durchquert Planck-Länge

Messung: Vergleichsmaßstab

- Länge
David von Schottland 1150 definierte:
Die durchschnittliche Daumendicke dreier Männer
(ein großer, ein mittlerer, ein kleiner) sei 1 Zoll
- Masse
Samen Johannisbrot: 200 mg → Karat
- Zeit
Was sind die Vergleichsmaßstäbe?



Natürliche Zeiteinheiten: astronomisch

Regelmäßiger Gang der Gestirne:

- Umlauf der Erde um die Sonne: 1 Jahr
- Umlauf des Mondes um die Erde: 1 Monat
- Umdrehung der Erde: 1 Tag



Natürliche Zeiteinheiten: Tageseinteilung

1/12 der Zeit zwischen Sonnenauf- und Untergang
(geschätzt anhand Sonnenstand, z.B. Sonnenuhr)

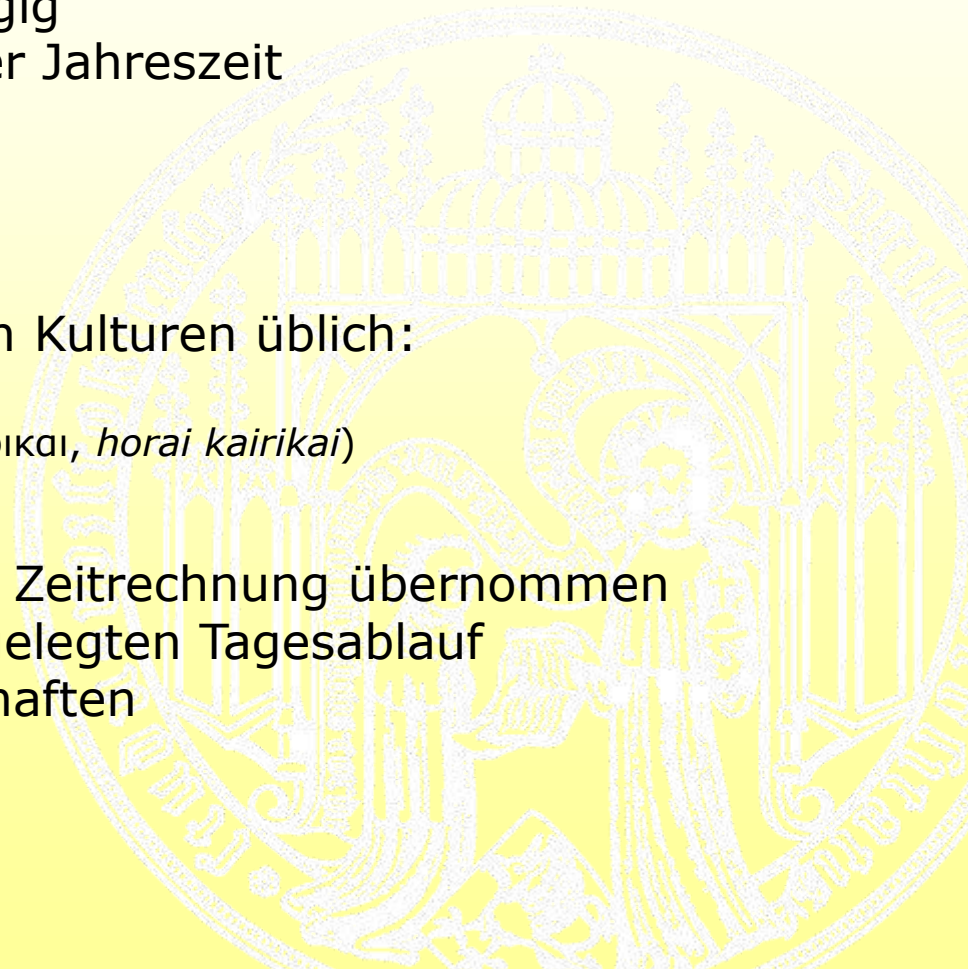
Temporalstunde

Die Stundendauer ist dabei abhängig
vom geografischen Ort und von der Jahreszeit

Temporale Stunden waren in vielen Kulturen üblich:

- Altes Ägypten
- Klassische griechische Antike (ωραι καιρικαι, *horai kairikai*)
- Jüdisches Religionsgesetz (Halacha)

In Mitteleuropa aus der römischen Zeitrechnung übernommen
und gebräuchlich; regelt u.a. festgelegten Tagesablauf
der klösterlichen Ordensgemeinschaften



Historische Methoden der Zeitmessung

- Pulsschlag ca. 1 Sekunde, aber starke Schwankung
- Bedarf für technische Vorrichtungen



- Wasseruhr: Tropfenuhr (griech. Klepsydra)
- seit dem 16. Jhdt v. Chr.
- Ktesibios aus Alexandria im 3.Jhdt. vor Chr.
- verbreitet von Ägypten, Griechenland bis China
- Der Kalif Harun al-Raschid schenkte Karl dem Großen eine Wasseruhr

Peking, Wasseruhr in der Verbotenen Stadt
Foto: Jakob Halun

Historische Methoden der Zeitmessung

Sanduhr (Stundenglas)
seit Anfang des 14. Jahrhunderts

Frühester Beleg in der Malerei:
1338 Fresko von Ambrogio Lorenzetti
„Allegorie der Guten Regierung“
im Palazzo Pubblico (Siena)



Historische Methoden der Zeitmessung

Weitere Vorgänge,
die einigermaßen gleichmäßig ablaufen:

- Kerzenuhren
- Feueruhren
- ab 900 n. Chr. in Europa



Wachsende Anforderungen an Zeitmessung

- Zunahme überregionaler Handelsbeziehungen (z.B. Hanse ab ca. 1200)
- Logistik beim Warenumsschlag erfordert Zeitplanung
- Temporalstunden wenig geeignet



Beginn der „modernen“ Zeitmessung

- Räderuhr ab Beginn des 14. Jhdts. (Mailand 1336!)
- Foliot (Waag und Spindel), später Pendel als Taktgeber
- Erfindung der Hemmung
- Messung der Zeit durch schrittweise statt kontinuierliche Prozesse

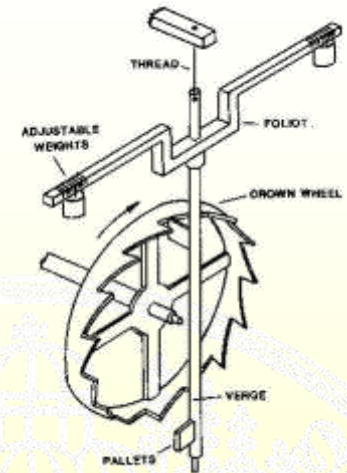


Hemmung der
Astronomischen Uhr
in Rostock

(Pendelmechanismus
erst seit 1710)

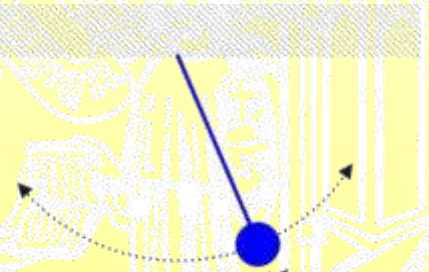
Spindel-Waag-Mechanismus

- Ballistische Bewegung einer Masse bzw. eines Trägheitsmoments
- Gang stark von Einzelheiten des Stoßes abhängig
- elektronisches Äquivalent: Multivibrator. Heute bei low-cost-Anwendungen, z.B. blinkender Christbaumschmuck



Pendel

- Kräftebalance aus Gewichtsantrieb und Trägheit reguliert Bewegung
- Eigenfrequenz („Isochronismus“) stabilisiert Gang
- elektronisches Äquivalent: Oszillator mit Schwingkreis oder Quarz. Heute Standard für alle Schwingungserzeugung von elektronischer Musik bis zur Funktechnik



Galileo's Entdeckung

- Leuchter im Dom zu Pisa pendelt



Galileo's Entdeckung

- Leuchter im Dom zu Pisa pendelt
- Galileo nutzt 1583 seinen persönlichen Puls als Uhr, um die Schwingungsdauer zu messen
- Er meint zu beobachten, dass die **Schwingungsdauer** von der **Schwingweite** unabhängig ist (**Isochronismus**)
- Das ist **falsch**; er hätte es bemerken müssen!
Einer der ersten bekannten wissenschaftlichen *fakes*
- Er stellt aber auch klar, dass die Schwingungsdauer von der **Pendelmasse** unabhängig ist.
Das **stimmt!**
- Daraufhin entwirft er ein Uhrwerk mit Pendel und Hemmung, erlebt aber die Fertigstellung nicht mehr (†1642)

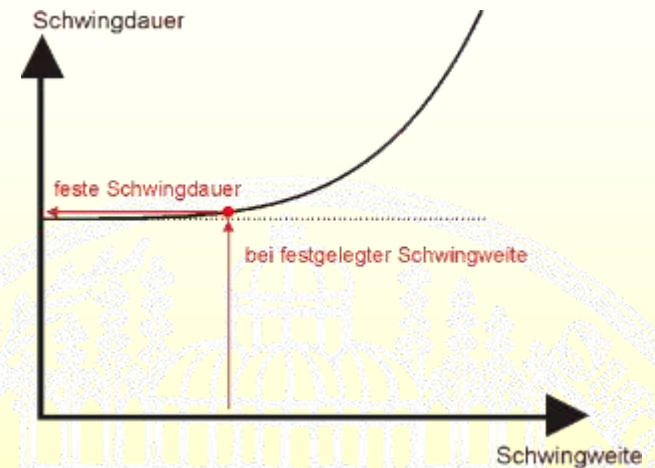


Wie ist das mit dem Pendel richtig?

- Falsch ist:
Die Schwingdauer ist unabhängig von der Schwingweite
- Richtig ist:
Die Schwingdauer hängt nur geringfügig von der Schwingweite ab, und zwar um so weniger, je kleiner die Schwingweite ist
- Richtig ist ferner:
Die Schwingdauer ist unabhängig von der schwingenden Masse

Damit ist allein durch die gegebene Länge des Pendels bereits ein recht guter Zeitstandard realisiert

- Richtig ist aber auch:
Jedes Pendel kommt wegen Reibung etc. irgendwann ganz zur Ruhe



Wie kann man daraus einen nützlichen Zeitmesser machen?

- Das Pendel muss immer wieder sachte angeschubst werden, damit die Schwingweite stets ziemlich gleich bleibt
- Die Hemmung bewirkt dieses dosierte Anschubsen und hält dadurch die Schwingweite konstant
- Erfindung des mechanischen Uhrwerks:
 - Zeitgeber: Pendel
 - Regulierung: Hemmung
 - Energievorrat: Gewicht
- Diese Grundzutaten finden sich bis heute in jedem Uhrwerk

Zahlreiche Varianten:

Pendel ⇒ Torsionspendel (Unruh)

Gewicht ⇒ aufgezozene Spiralfeder

Peter Henlein 1505 (Nürnberg): transportable Tischuhren

Ein stiller Umsturz im Weltbild

- Seit der Antike galt die Bewegung der Himmelskörper als perfekt: Kreisbahnen, perfekt regelmäßige Bewegung
- Aufgrund von Beobachtungen von Tycho Brahe → konnte Kepler zeigen: keine Kreisbahnen, kein perfektes Gleichmaß
- Ein Uhrwerk läuft gleichmäßiger als das Himmelsgeschehen...!



Mechanische Uhren zeigen keine Temporalstunden an;
gut gebaute Uhren laufen gleichmäßiger als der Tageswechsel

äquinoktiale Stunden

Anbahnung des „mechanistischen“ Weltbildes
(Determinismus: Laplace, Leibniz, ...)

Einführung gleichmäßiger Stunden

- In Handel und Gewerbe setzen sich die gleichmäßigen mechanisch gemessenen **Aquinoktialstunden** bald durch
- In Klöstern etc. bleibt es noch einige Zeit bei den **Temporalstunden**
- Damalige Uhren sind aufwendig, aber prestigeträchtig
- Wohlhabende Städte bringen eine Uhr an hervorragendem Platz (Hauptkirche) an



Navigation

- Navigation ist, wenn man trotzdem hinkommt...
- Geografische Breite mit Sextanten einfach zu bestimmen
- Geografische Länge erfordert Kenntnis der genauen Uhrzeit
- Scilly-Marine-Desaster: Im Spanischen Erbfolgekrieg läuft am 22.10.1707 die Britische Flotte (21 Schiffe) unter Sir Cloudesley Shovell auf dem Heimweg auf die Scilly-Inseln auf: zwischen 1400 und 2000 Tote
- Kommission gegründet und 1714 Preisgeld ausgesetzt für genaue Längenmessung auf See.

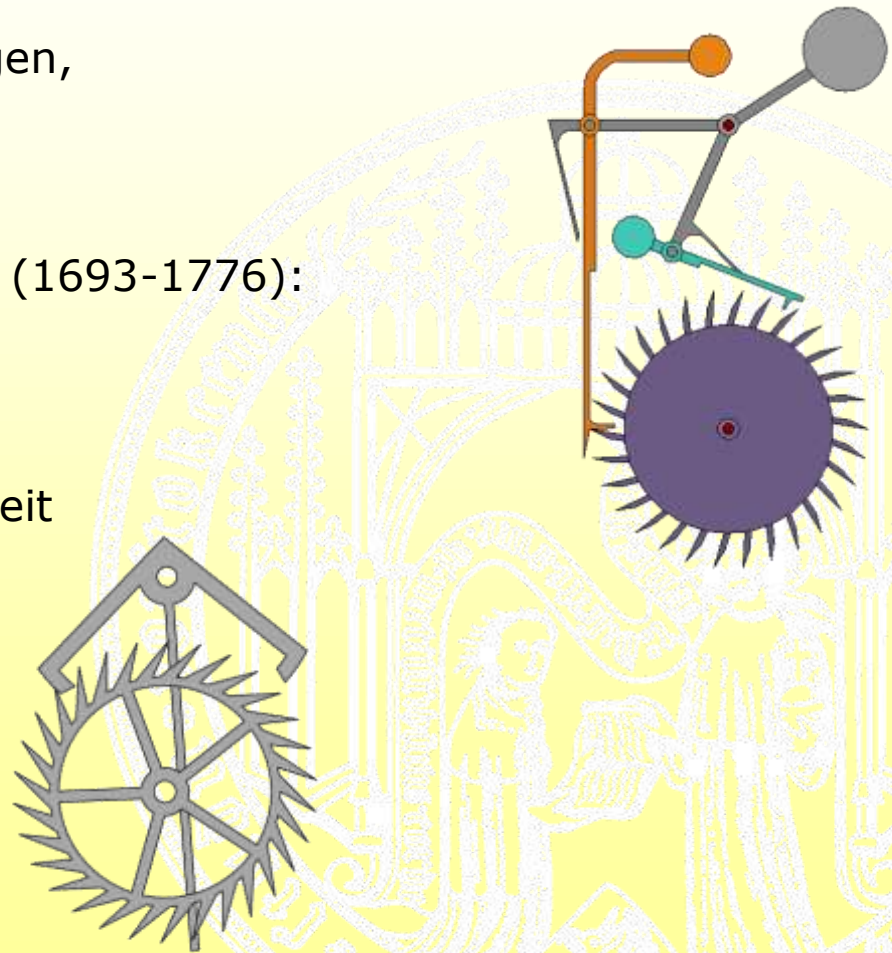


Weiterentwicklung des Uhrwerks

- Auf Schiffen braucht man Zeitmessung zur Navigation
- Pendeluhren müssen ruhig hängen, sonst gehen sie ganz falsch
- Drehpendel
- Chronometer von John Harrison (1693-1776):
 - Grasshopper-Hemmung
 - Temperaturkompensation

Revolution in der Ganggenauigkeit

- später Ankerhemmung



Elektronische Uhren

- Übertragung der Grundidee der mechanischen Uhr:
- „Pendel“ als Zeitgeber ersetzt z.B. durch Schwingquarz (erstmalig 1929)
- Hemmung durch Oszillatorschaltung (definierte Rückkopplung)
- Batterie o.ä. als Energiequelle

Schwingquarze sind

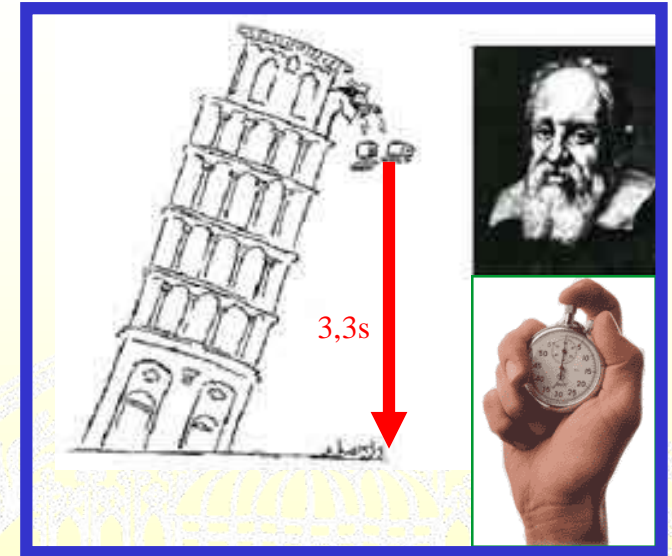
- recht steif, d.h. äußere Erschütterungen wirken sich kaum aus
- sehr klein, d.h. das Uhrwerk wird ebenfalls sehr klein
(in Armbanduhr geschnitten für $2^{15} = 32768$ Schwingungen/Sekunde)
- ziemlich ganggenau:
einige 10^{-6} (≈ 10 s/Monat) wenn die Temperatur im Alltag schwankt

ca. 10^{-8} (≈ 1 s/Jahr) im Thermostaten



Weitere Verbesserungen

- Die Genauigkeit wird umso besser, je schneller die zugrundeliegende Schwingung ist
- Suche nach wohldefinierten Schwingungen mit hoher Schwingfrequenz
- Atome und Moleküle haben diskrete Energiezustände, die bei allen Atomen derselben Sorte identisch sind und die von Umwelteinflüssen nur minimal beeinflusst werden.
- Übergänge zwischen diesen Zuständen (Energiedifferenz E) entsprechen einer bestimmten Frequenz ν gemäß $E=h\nu$ (Einstein)
- Der Wechsel von 32768 Hz (Quarz) zu vielen MHz bis einigen GHz (Atome) bringt erheblichen Genauigkeitsgewinn



Atomuhren

- Suche nach besonders stabilen Übergängen im höchsten radiotechnisch zugänglichen Frequenzbereich (einige GHz)
- Erfolgreich: Cäsium

Pendel ⇒ präparierte Cäsiumatome

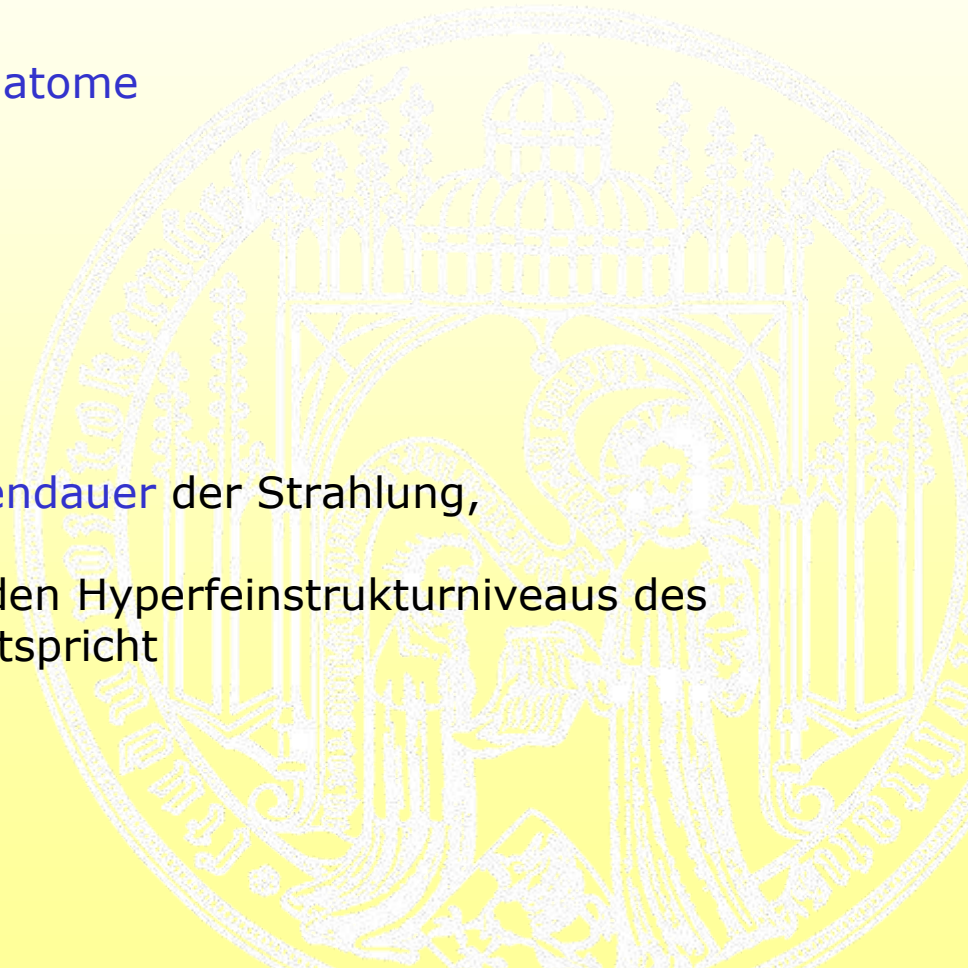
Hemmung ⇒ Oszillatorschaltung

Gewicht ⇒ Stromversorgung

- Die Sekunde ist definiert durch

das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung,

die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von ^{133}Cs -Atomen entspricht



Reichs-Gesetzblatt.

N^o 7.

Inhalt: Gesetz, betreffend die Einführung einer einheitlichen Zeitbestimmung. S. 93.

(Nr. 2075.) Gesetz, betreffend die Einführung einer einheitlichen Zeitbestimmung. Vom 12. März 1893.

Wir Wilhelm, von Gottes Gnaden Deutscher Kaiser, König von Preußen &c.

verordnen im Namen des Reichs, nach erfolgter Zustimmung des Bundesraths und des Reichstags, was folgt:

Die gesetzliche Zeit in Deutschland ist die mittlere Sonnenzeit des fünfzehnten Längengrades östlich von Greenwich.

Dieses Gesetz tritt mit dem Zeitpunkt in Kraft, in welchem nach der im vorhergehenden Absatz festgesetzten Zeitbestimmung der 1. April 1893 beginnt.

Urkundlich unter Unserer Höchsteigenhändigen Unterschrift und beigedrucktem Kaiserlichen Insignel.

Gegeben Berlin Schloß, den 12. März 1893.

(L. S.)

Wilhelm.

Graf von Caprivi.

Verfaßtgegeben im Reichsamt des Innern.
Berlin, gedruckt in der Reichsdruckerei.



Gesetzliche Zeit in Deutschland

- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig
Abteilung 4.4: Zeit und Frequenz
⇒ definiert die gesetzliche Zeit in Deutschland
- Vier primäre Cäsiumuhren, Genauigkeit 10^{-15} :
1 Sekunde in 30 Millionen Jahren bzw. $1 \mu\text{s}$ in 30 Jahren
- Verbreitung des Normalzeitsignals auf verschiedenen Wegen:
 - Telefonzeitdienst
 - Internet
 - Funk (DCF77)



DCF77

- Zeitzeichensender auf Längstwelle 77,500 kHz
- Standort Mainflingen (Reg.bezirk Darmstadt)
- empfangbar in ganz Europa
- erfordert nur sehr einfache Empfänger (preiswert)
- Einsatz für öffentliche Normaluhren, aber auch Armbanduhren

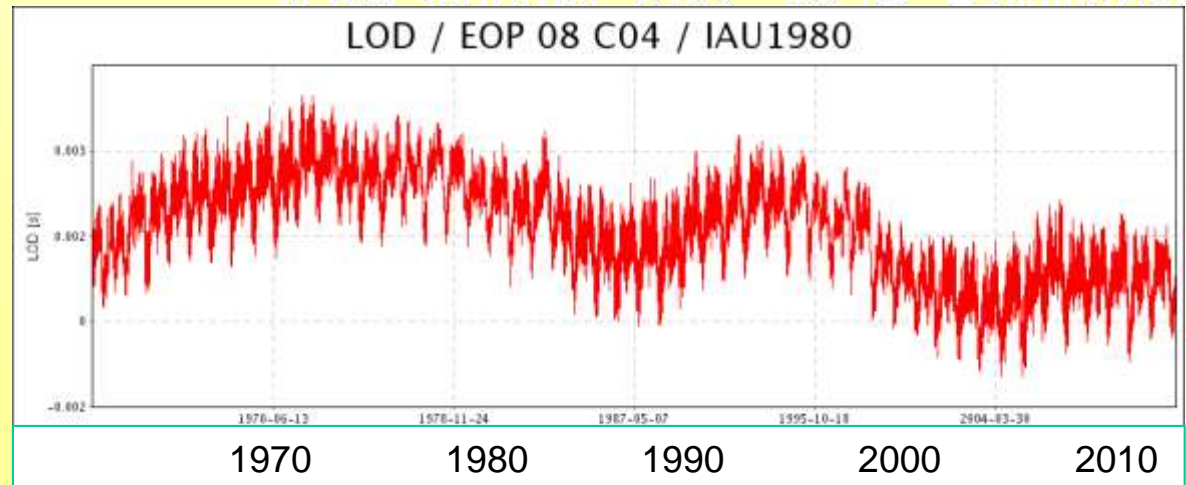


Die himmlische Uhr ist gar nicht so konstant...

Unregelmäßigkeiten des Ablaufs der Erdrotation werden immer deutlicher:

- Generelle Verlangsamung
- Unregelmäßige Schwankung der Tageslänge
- Plötzliche Veränderung bei Großereignissen wie Erdbeben
- Abhilfe: Schaltsekunden nach Bedarf

LOD = length of day,
Tageslänge



The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake

Richard S. Gross · Benjamin F. Chao

Received: 21 November 2005 / Accepted: 27 June 2006 /

Published online: 12 August 2006

© Springer Science+Business Media B.V. 2006

Abstract Besides generating seismic waves, which eventually dissipate, an earthquake also generates a static displacement field everywhere within the Earth. This global displacement field rearranges the Earth's mass thereby causing the Earth's rotation and gravitational field to change. The size of this change depends upon the magnitude, focal mechanism, and location of the earthquake. The Sumatran earthquake of December 26, 2004 is the largest earthquake to have occurred since the 1960 Chilean earthquake. Using a spherical, layered Earth model, the coseismic effect of the Sumatran earthquake upon the Earth's length-of-day, polar motion, and low-degree harmonic coefficients of the gravitational field are computed. Using a model of the earthquake source that is composed of five subevents having a total moment-magnitude M_w of 9.3, it is found that this earthquake should have caused the length-of-day to decrease by 6.8 microseconds, the position of the Earth's generalized figure axis to shift 2.32 milliarcseconds towards 127° E longitude, the Earth's oblateness J_2 to decrease by 2.37×10^{-11} and the Earth's pear-shapedness J_3 to decrease by 0.63×10^{-11} . The predicted change in the length-of-day, position of the generalized figure axis, and J_3 are probably not detectable by current measurement systems. But the predicted change in oblateness is perhaps detectable if other effects, such as those of the atmosphere, oceans, and continental water storage, can be adequately removed from the observations.



Besser als Atomuhren?

- Optische Uhr
- Bei Erfindung des Lasers vor 52 Jahren eine wichtige Motivation
- Laser sind Oszillatoren für optische Frequenzen:
ca. 500 THz \Rightarrow 100 000 mal kürzerer Schwingdauer als bei Atomuhr
- Leider sind Laser nicht übermäßig stabil (Schawlow-Townes-Linienbreite)

Die Lösung:
Anschluss an Atomuhr mit festem Frequenzverhältnis
per „Frequenzkette“



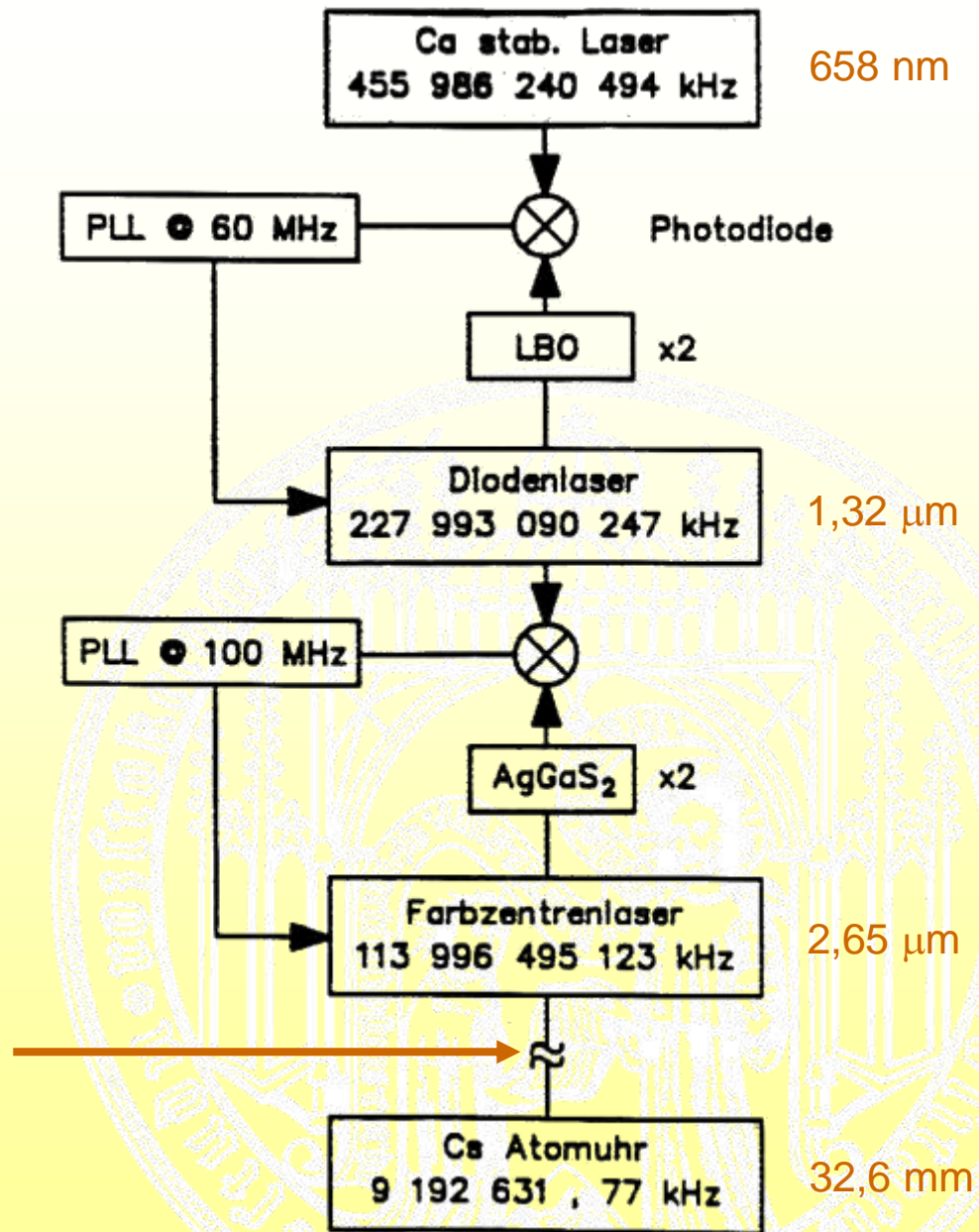
Zahnräder drehen sich im Verhältnis ihrer Zahnanzahl

Prinzip der hochfrequenten Stufen
der **Frequenzkette**
an der PTB Braunschweig:

Von der Cs-Atomuhr bei 9 GHz
zum Ca-stabilisierten
Laserfrequenznormal bei 456 THz:
Übersetzung $\approx 49\,600$ -fach

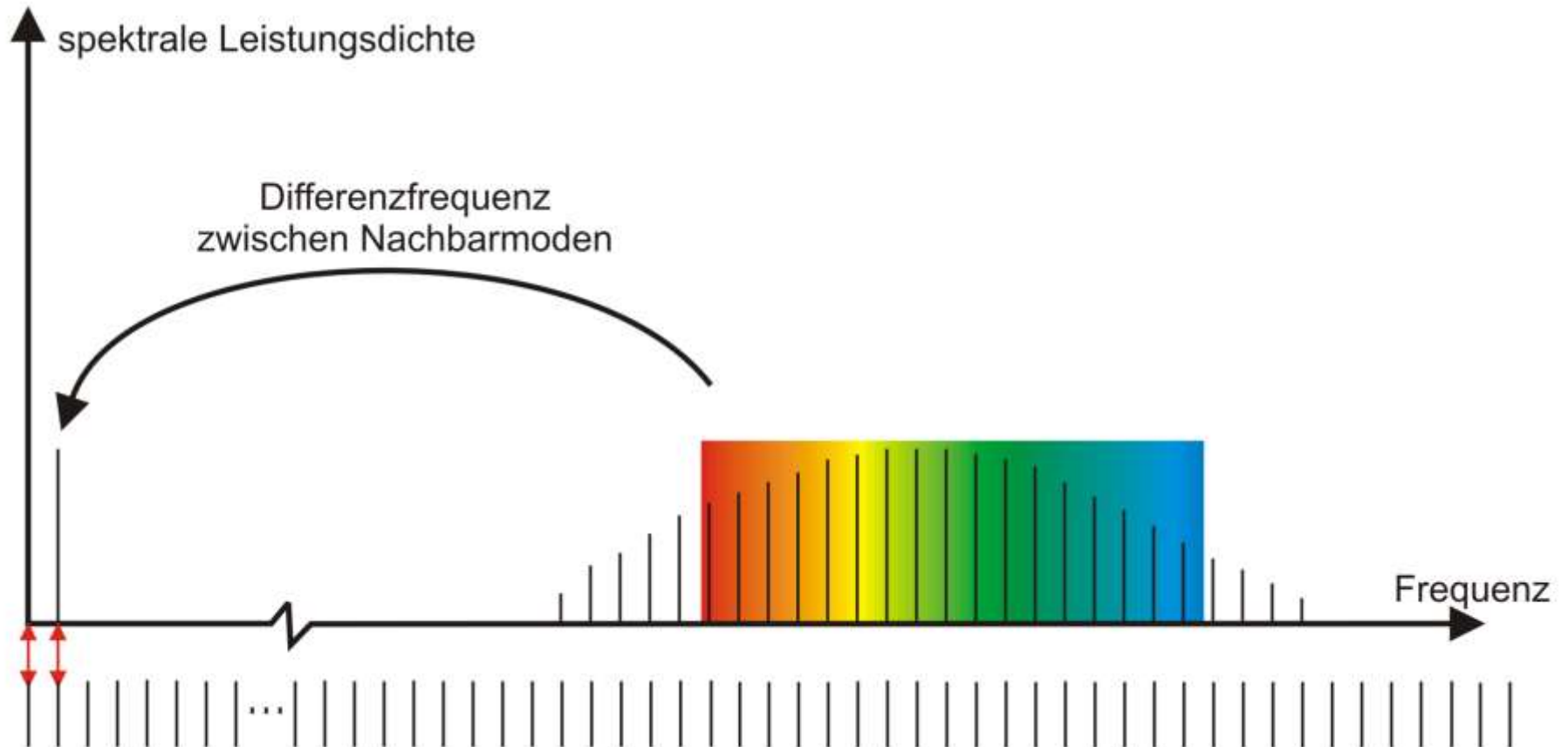
... eine unglaublich
aufwendige Technik!

Lücke 9 GHz bis 113 THz
nicht dargestellt

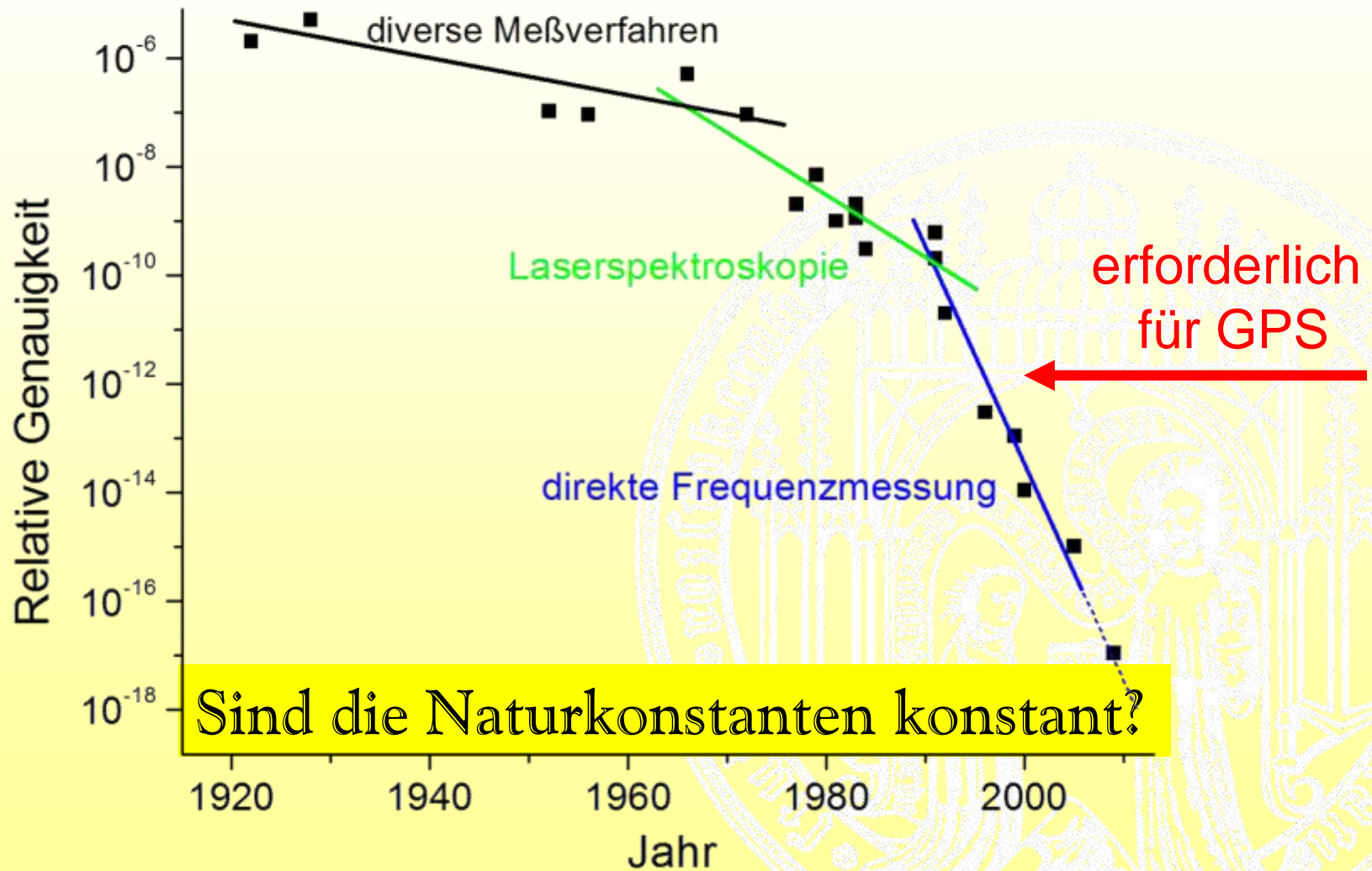


Frequenzkammtechnik (Hänsch, Hall: Nobelpreis 2005)

Raffinierter Trick, um einen Laser (optischen Oszillator) und eine Atomuhr (Mikrowellenoszillator) in einem einzigem Schritt (statt der komplexen Frequenzkette) starr zu koppeln



Entwicklung optischer Präzisionsmessung von Zeit bzw. Frequenz



Wo stehen wir heute?

- Keine andere physikalische Größe kann mit der gleichen Präzision gemessen werden wie Zeit bzw. Frequenz
- Messungen von wenigen Femtosekunden;
Hochgeschwindigkeitsvorgänge (z.B. Chlorophyllreaktion)
- Indirekt sogar Impulse im Attosekundenbereich
(1 as = 10^{-18} s = 0,000 000 000 000 000 001 s)
- Definition der Längeneinheit (Meter) seit 1983
per Definition der Sekunde
und *Festlegung* der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
- Uhren mit Nanosekunden Genauigkeit stecken in jedem GPS-Empfänger („Navi“)
- Genaue Zeitmessung zeigt Phänomene der allgemeinen Relativitätstheorie:
Vergleich zweier baugleicher Atomuhren – eine am Boden und eine in einem Satelliten– beweist: Uhren im Schwerefeld gehen langsamer
Ungenauigkeit der Höhenangaben in Landkarten beeinträchtigt bereits die besten Uhren!

Wo stehen wir heute?

DER SPIEGEL 15. 10. 2012 S. 130-131

PHYSIK

Eine Sekunde seit dem Urknall

In Braunschweig wird der genaueste Zeitmesser aller Zeiten gebaut. Möglich wird die Quantenuhr durch Experimente eines diesjährigen Nobelpreisträgers.

Um das Vergehen von Jahrmillionen zu vermessen, die Tiefe der Ozeane und die Höhe des Mount Everest, genügt ein einziges Atom.

Genau daran forscht der Physiker Piet Schmidt. „Wir wollen die genaueste Uhr der Welt bauen“, sagt der 42-Jährige. Er steht in einem verdunkelten Labor in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB). Hinter ihm ist ein riesiger Wust aus Schaltern, Kabeln und Kühlgeräten aufgebaut. Die Apparatur misst den Puls geladener Atome. Die flimmern zwischen zwei physikalischen Zuständen hin und her wie ein Pendel.

Schmidts Quantenuhr soll in 14 Milliarden Jahren weniger als eine Sekunde falsch gehen – also in einem Zeitraum vom Urknall bis heute.

Die 1,2-Meter-stumpfen und wieckka der Maßeinheiten, in Braunschweig werden von jeher Qualitätssekunden für den Export hergestellt.

In einem turnhallengroßen Saal, der mit rötlichem Kupfer ausgeschlagen ist, um ihn vor Radiowellen abzuschirmen, messen herkömmliche Cäsium-Atom-



Physiker Wineland mit Ionenfalle
Überholt der Schüler seinen Lehrer?

Quantenrechner auszubauen: einem Computer, der nicht mehr mit elektronischen Chips rechnet, sondern mit den eigenartigen Energiezuständen schwingender Atome.

Solche Teilchen gehorchen den rätselhaften Gesetzen der Quantenphysik: Ionen vermögen mehrere physikalische Zustände zugleich anzunehmen; sie sind Schalter, die gleichzeitig auf „An“ und „Aus“ stehen können. Dadurch ließen sich theoretisch in kürzester Zeit riesige Datenmengen verarbeiten, etwa in der Klimaforschung oder beim Knacken verschlüsselter Botschaften.

„Vielleicht wird der Quantencomputer unseren Alltag so radikal verändern, wie es der klassische Computer im letzten Jahrhundert getan hat“, spekuliert das Nobelpreis-Komitee.

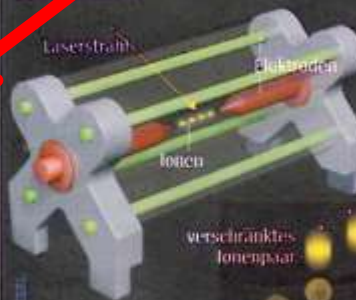
Neben dem Berechnen und Übertragen von Informationen eignet sich die Bestimmung und Manipulation von Quantenzuständen aber vor allem zur Zeitmessung. Vor gut zwei Jahren stellte das NIST in Boulder eine sensationell genaue optische Quantenuhr vor. Der Rekord steht bis heute: In über drei Milliarden Jahren würde sie nur eine Sekunde falsch gehen.

„Wir wollen diesen Wert um eine Größenordnung übertreffen“, verkündet Piet Schmidt. Noch bevor seine Uhr fertig ist, hat er ein Einsatzgebiet für sie ausgemacht: die Nachjustierung von Karten der Erdoberfläche – mit Hilfe eines atomaren Zollstocks. „Laut Einsteins Relativitätstheorie verläuft die Zeit langsamer, je stärker das Gravitationsfeld ist, in dem sie gemessen wird“, sagt Schmidt. „Diesen Effekt wollen wir für die Vermessung

$2 \cdot 10^{-18}$

Spukhafter Teil

Experiment des Physik-Nobelpreisträgers David Wineland



1. Winelands Gruppe gelang es, einzelne Ionen zuzuführen. Aufgereiht wie auf einer Perlenkette werden sie mittels elektrischer Felder in einer tiefgekühlten Vakuumkammer gefangen gehalten. Durch gezielten Beschuss mit einem Laserstrahl können einzelne Ionen in eine Überlagerung zweier unterschiedlicher Energiezustände gebracht und beobachtet werden – ein Phänomen, das Quantenphysiker lange nur theoretisch beschreiben konnten.

2. Durch einen sanften Impuls kann der Zustand eines angeregten Ions auf ein benachbartes Teilchen übertragen werden. Ohne dass sie in direktem Kontakt stehen, sind beide Ionen wie ein Zwillingpaar verschränkt.

Eine Sekunde seit dem Urknall

DER SPIEGEL wird der aller Zeiten gebaut. Möglich wird die Quantenuhr durch Experimente eines diesjährigen Nobelpreisträgers.

Um das Vergehen von Jahrmillionen zu vermessen, die Tiefe der Ozeane und die Höhe des Mount Everest, genügt ein einziges Atom.

Genau daran forscht der Physiker Piet Schmidt. „Wir wollen die genaueste Uhr der Welt bauen“, sagt der 42-Jährige. Er steht in einem verdunkelten Labor in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB). Hinter ihm ist ein riesiger Wust aus Schaltern, Kabeln und Kühlgeräten aufgebaut. Die Apparatur misst den Puls geladener Atome. Die flimmern zwischen zwei physikalischen Zuständen hin und her wie ein Pendel.

Schmidts Quantenuhr soll in 14 Milliarden Jahren weniger als eine Sekunde falsch gehen – also in einem Zeitraum vom Urknall bis heute.

Die PTB ist so etwas wie ein Mekka der Maßeinheiten, in Braunschweig werden von jeher Qualitätssekunden für den Export hergestellt.

In einem turnhallengroßen Saal, der mit rötlichem Kupfer ausgeschlagen ist, um ihn vor Radiowellen abzuschirmen, messen herkömmliche Cäsium-Atomuhren – jede so groß wie eine Flugzeugturbine – die Zeit in Schritten von weniger als einer milliardstel Sekunde.

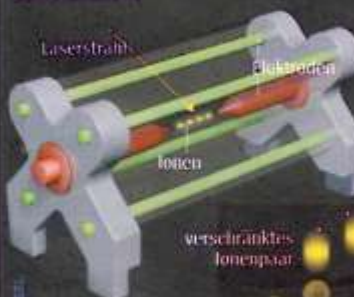
Aus aller Welt laufen hier die Signale von rund 400 Atomuhren ein. Die Braunschweiger mischen aus diesem Durcheinander, in Abstimmung mit anderen Labors, die Koordinierte Weltzeit (UTC).

Dann senden die Zeitmesser ihr Signal wie eine Art Kirchturmschlag per Glasfaserkabel in die Nähe von Frankfurt, von wo aus der Langwellensender DCF77 den Zeittakt in den Äther funkt, empfangbar von Helsinki bis Tokio, von Moskau bis



Spukhafte Teilchen

Experiment des Physik-Nobelpreisträgers David Wineland



JOHN HENNINGSEN

3. stündige Anwendungen

Optische Atomuhren

Schwingungsmessung an einzelnen Atomen führt zu vielfacher Genauigkeit

Quantencomputer

Superrechner, die auf Teilchenzuständen, sogenannten Q-Bits, basieren

Quantenkommunikation

Datenübertragung über große Distanzen mittels verschränkter Teilchen

1. Winlands Gruppe gelang es, einzelne Ionen zu isolieren. Aufgereiht wie auf einer Perlenkette werden sie mittels elektrischer Felder in einer tiefgekühlten Vakuumkammer gefangen gehalten. Durch gezielten Beschuss mit einem Laserstrahl können einzelne Ionen in eine Überlagerung zweier unterschiedlicher Energiezustände gebracht und beobachtet werden – ein Phänomen, das Quantenphysiker lange nur theoretisch beschreiben konnten.

2. Durch einen sanften Impuls kann der Zustand eines angeregten Ions auf ein benachbartes Teilchen übertragen werden. Ohne dass sie in direktem Kontakt stehen, sind beide Ionen wie ein Zwillingsspaar verschränkt.

Physiker Wineland mit Ionenfalle
Überholt der Schüler seinen Lehrer?

Quantenrechner auszubauen: einem Computer, der nicht mehr mit elektronischen Chips rechnet, sondern mit den eigenartigen Energiezuständen schwingender Atome.

Solche Teilchen gehorchen den rätselhaften Gesetzen der Quantenphysik: Ionen vermögen mehrere physikalische Zustände zugleich anzunehmen; sie sind Schalter, die gleichzeitig auf „An“ und „Aus“ stehen können. Dadurch ließen sich theoretisch in kürzester Zeit riesige Datenmengen verarbeiten, etwa in der Klimaforschung oder beim Knacken verschlüsselter Botschaften.

„Vielleicht wird der Quantencomputer unseren Alltag so radikal verändern, wie es der klassische Computer im letzten Jahrhundert getan hat“, spekuliert das Nobelpreis-Komitee.

Neben dem Berechnen und Übertragen von Informationen eignet sich die Bestimmung und Manipulation von Quantenzuständen aber vor allem zur Zeitmessung. Vor gut zwei Jahren stellte das NIST in Boulder eine sensationell genaue optische Quantenuhr vor. Der Rekord steht bis heute: In über drei Milliarden Jahren würde sie nur eine Sekunde falsch gehen.

„Wir wollen diesen Wert um eine Größenordnung übertreffen“, verkündet Piet Schmidt. Noch bevor seine Uhr fertig ist, hat er ein Einsatzgebiet für sie ausgemacht: die Nachjustierung von Karten der Erdoberfläche – mit Hilfe eines atomaren Zollstocks. „Laut Einsteins Relativitätstheorie verläuft die Zeit langsamer, je stärker das Gravitationsfeld ist, in dem sie gemessen wird“, sagt Schmidt. „Diesen Effekt wollen wir für die Vermessung der Welt ausnutzen.“

Sein Plan: Bis 2014 will er seine Quantenuhr so klein und mobil machen, dass sie in einen Container passt. Dann will er an die Nordsee fahren, um dort die Meereshöhe neu zu ermitteln. Denn je nach Abstand vom Erdkern herrscht eine unterschiedlich starke Schwerkraft; und die wiederum verändert die Zeitmessung der Quantenuhr.

„Derzeit verlassen sich Kartografen auf ungenau ermittelte Meeresoberflächen“, sagt Jakob Flury vom Institut für Erdmessung in Hannover. Bislang betrage der Fehler bei Höhenangaben oft über 20

Schmidts Rekordversuch ist ambitioniert. Immerhin wurden seine größten Konkurrenten vorige Woche mit dem Physik-Nobelpreis geehrt. Der amerika-

Doch nun will der Schüler seinen Lehrer überholen.

Wineland hat Techniken entwickelt, ein einzelnes Atom in einer sogenannten

Wo stehen wir heute?

Die Grundzutaten

- **Taktgeber**
- **Regulierer**
- **Energievorrat**

sind dieselben geblieben (nur in anderer Form).

Manche Dinge ändern sich nie.

In diesem Sinn
ist unsere *Astronomische Uhr*
auf der Höhe der Zeit!



Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!

