

<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/hansch-slides.pdf>

.../info.html

(Dank an Thomas Udem)

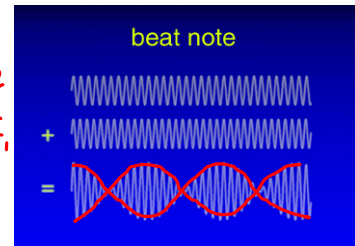
Ziel: Messung v. "optischen Frequenzen" $f \sim 10^{15} \text{ Hz}$
mit Genauigkeit 10^{-15} , $\delta f_i \sim 1 \text{ Hz}$

"Wie zählt man von 0 auf 10^{15} in einer Sekunde?"

$\frac{\omega_i}{2\pi} = f_i$ ist zu schnell, um direkt gemessen zu werden
(Caesium-Atomuhr) tickt 10^5 mal langsamer)

Methoden: Überlagere Signal mit unbekannter Frequenz $f_1 = ?$
mit Referenzsignal mit genau bekannter Frequenz $f_2 \approx f_1$

und messe Frequenz f_{12} der "Schwebungen":



$$\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) = 2 \cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)t\right] \cos\left[\frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)t\right] \quad (1)$$

$$f_{12} = \frac{1}{2}(f_1 - f_2) \approx 10^9 \text{ Hz} \text{ viel langsamer,} \quad (2)$$

messbar mit grosser Genauigkeit, $10^{-9} \Rightarrow 1 \text{ Hz}$

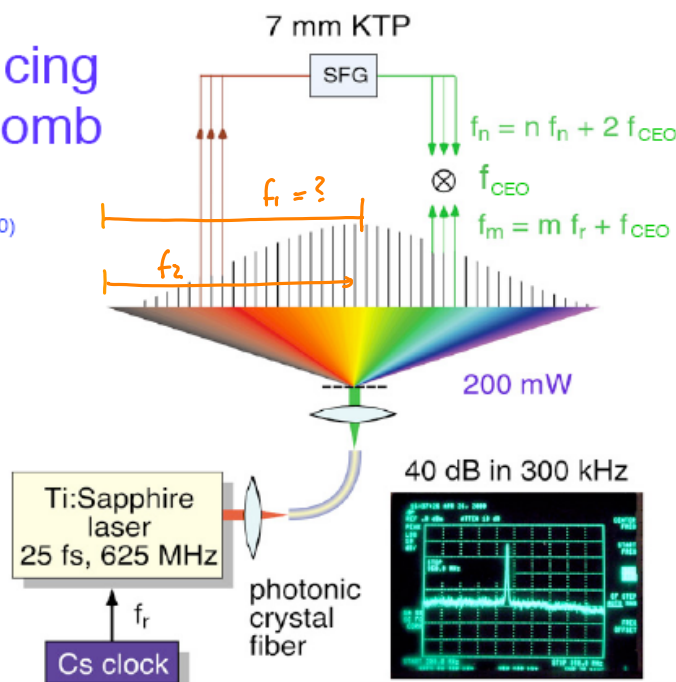
Idee von Hänsch: lese f_2 von einem Frequenzkamm ab!

Self-referencing frequency comb

R. Holzwarth et al.,
Phys. Rev. Lett **85**, 2264 (2000)

D. Jones et al.,
Science **288**, 635 (2000)

T.W. Hänsch,
Witnessed disclosure
(March 30, 1997)



Proposal for a universal optical frequency comb synthesizer

T. W. Hänsch
Max-Planck-Institut für Quantenoptik

(March 30, 1997)

Abstract

An optical frequency synthesizer is proposed which produces a wide comb of absolutely known equidistant marker frequencies throughout the infrared, visible, and ultraviolet spectral range. To this end, a white light continuum with pulse repetition rate f_p is produced by focusing the output of a mode-locked femtosecond laser into an optical fiber or bulk medium with a third order nonlinear susceptibility. The rate of phase slippage of the laser carrier relative to the pulse envelope f_s is monitored by observing a beat signal between the white light continuum and the second harmonic of the laser.

read and understood

*April 4, 1997 Martin Weitz
April 4, 1997 T. Udem*

Schritt 1: Generiere periodische Pulsfolge

Applet: <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt/index.html>



Überlagerung vieler stehender Wellen mit ähnlichen Frequenzen liefert scharfen Puls, der zwischen den Spiegeln hin und her läuft.

Teil der Amplitude jedes Pulses "leckt" durch Spiegel heraus, liefert periodische Kette von kurzen Pulsen.

Puls-kette:

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_p(t-n\tau) \cos(2\pi f_c t - \varphi) \quad (1)$$

Pulsform Trägerfrequenz: $f_c \approx 10^{15} \text{ Hz}$

Pulsdauer: $T_p \approx 2 \times 10^{-14} \text{ s} \sim 1/(\text{Bandbreite d. überlagerten stehenden Wellen}) \quad (2)$

$\Delta\omega \Delta t \sim 1$

Periode der Kette: $\tau \approx \frac{1}{6} \cdot 10^{-8} \text{ s} \sim (\text{Abstand zwischen Spiegeln}) \quad (3)$

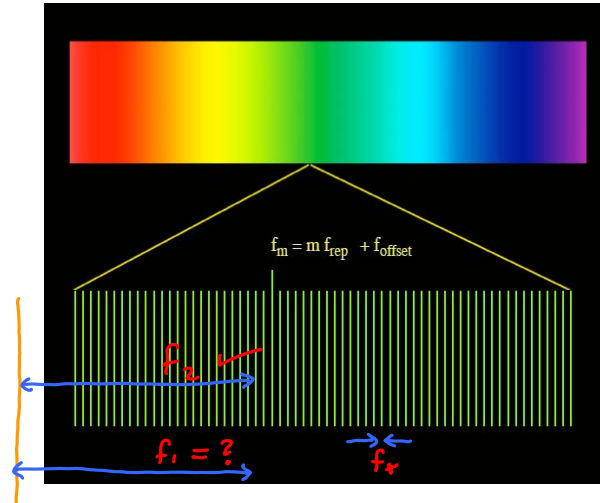
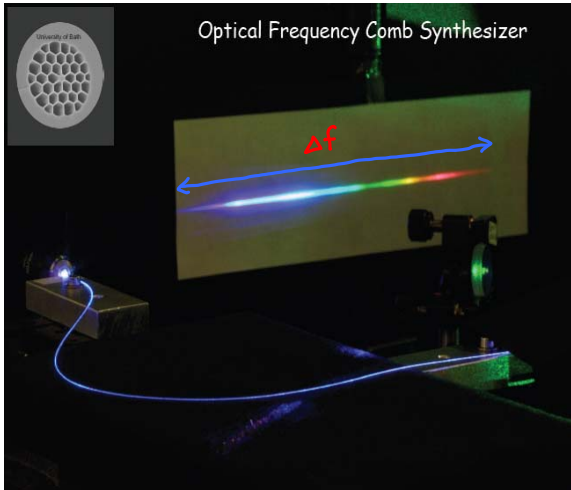
Repetitionsrate: $f_r = \frac{1}{\tau} \approx 6 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ langsam, gut messbar, mit Genauigkeit $10^{-9} \quad (4)$

Messgenauigkeit: $\delta f_r \approx 1 \text{ Hz} \quad (5)$

Schritt 2: Zerlege Pulsfolge nach Frequenzen

Fou 37

Fourierspektrum der periodischen Pulsfolge ist ein Frequenzkamm: $f_n = n f_r + f_0$



Kammbreite: invers proportional zur Dauer eines Pulses: $\Delta f = \frac{1}{T_p} \approx \frac{1}{2} 10^{14} \text{ Hz}$

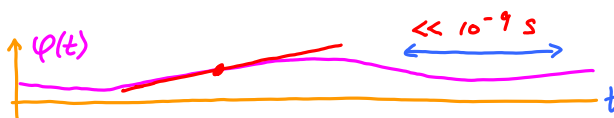
(Glasfaser verbreitert den Kamm zusätzlich auf 10^{15} Hz)

Frequenzauflösung: invers proportional zur Periode der Pulsfolge: $f_r = \frac{1}{T} = 6 \cdot 10^8 \text{ Hz}$

Anzahl diskrete Frequenzen: $\sim 10^{15} / 10^9 = 10^6$!

Komplikation: Phasenverschiebung enthält eine sehr langsame Zeitabhängigkeit: $\varphi(t)$
Das führt zu einem "Drift" des Frequenzkams

Fou 38

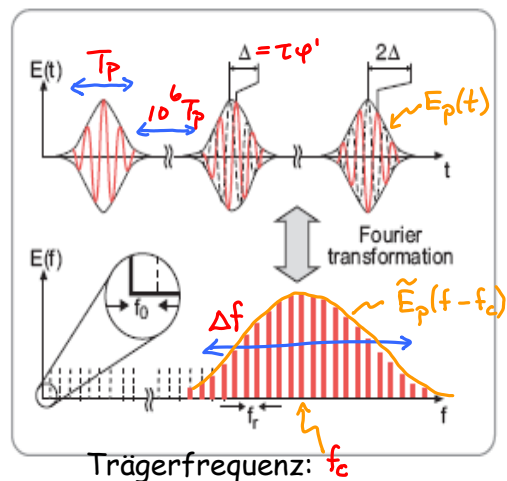


(Taylor) $\varphi(t) \approx \varphi + t \varphi'(t)$ (sehr langsame Fluktuationen) (1)

$$E(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_p(t - n\tau) \cos(2\pi f_c t - \varphi(t)) \quad (2)$$

$$\cos(2\pi f_c t - (\varphi + n\tau \varphi')) \quad (3)$$

Pulsfolge ist nicht streng phasenkohärent !



Frequenzspektrum:

(Hausaufgaben) $\tilde{E}(f) = \tilde{E}_p(f - f_c) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - (n f_r + f_0))$ (4) Kamm driftet!

Kamm verschoben um (sehr langsam fluktuiierende) "offset-Frequenz": $f_0(t) \propto \tau \varphi'(t)$ (5)

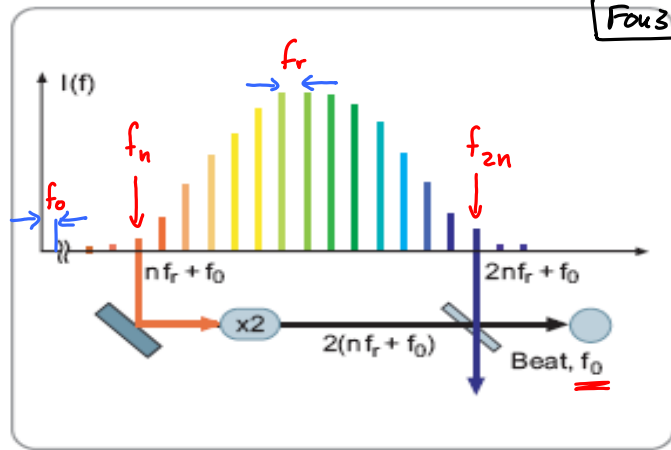
Kamm-Frequenzen: $f_n = n f_r + f_0$, (6) $f_r, f_0 \approx 10^8 - 10^9 \text{ Hz}$ } langsam, also im Prinzip gut messbar!

Schritt 3: Bestimmung v. f_0 :

Nehme breiten Kamm, der eine "ganze Oktave" enthält, d.h.

sowohl $f_n \stackrel{(38.6)}{=} n f_r + f_0$ (1)

als auch $f_{2n} \stackrel{(39.6)}{=} 2n f_r + f_0$ (2)



Überlagere Signale von $2f_n$ und f_{2n} !!

Das liefert Schwebung mit Frequenz:
("beat")

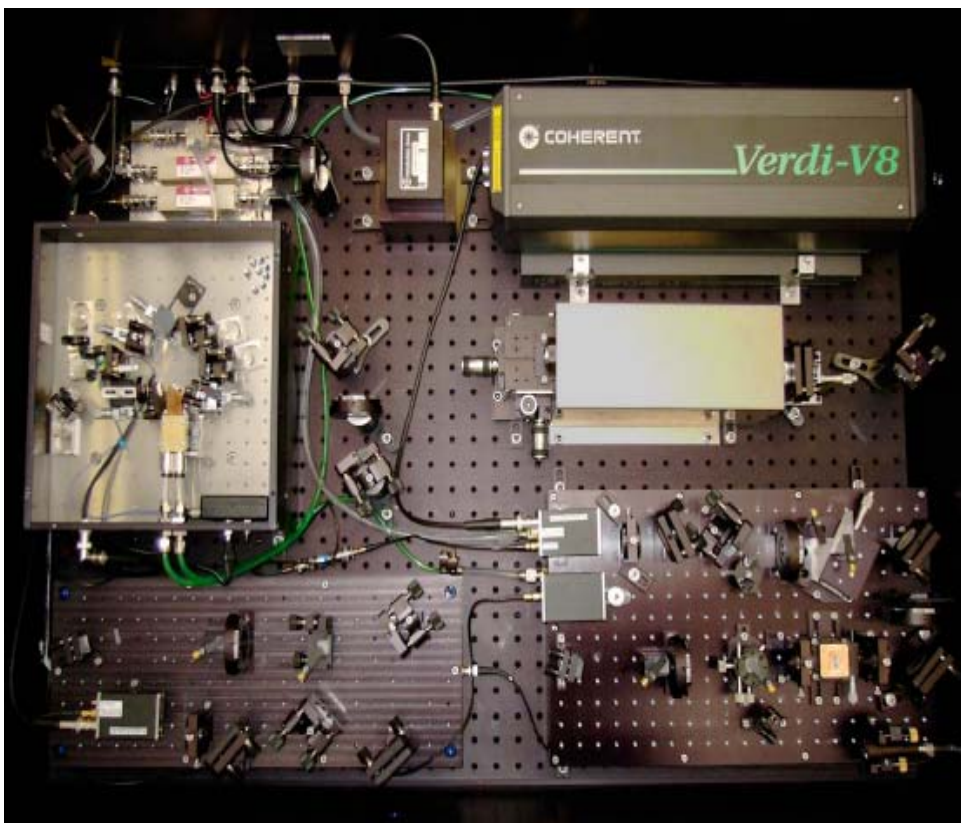
$$\frac{1}{2} [2f_n - f_{2n}] \quad (3)$$

$$\stackrel{(1,2)}{=} \frac{1}{2} [2(n f_r + f_0) - (2n f_r + f_0)] \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2} f_0 \quad \checkmark \text{ meßbar, also regelbar} \quad (5)$$

Alle Kammfrequenzen sind jetzt bekannt,
d.h. Referenzsignal ist kalibriert !

(siehe wieder Seite 34)



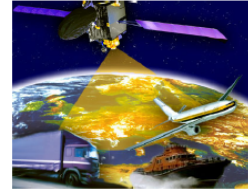
femtosecond laser frequency comb synthesizer

- 100 000 ultra-stable lasers at once
- revolutionary optical wave meter
- frequency counter from DC to UV
- clockwork for optical atomic clocks
- ultra-stable microwave source
- ...
- enabling tool for fundamental measurements
- arbitrary optical waveform synthesizer?
- ...
- source of phase-stabilized femtosecond pulses
- key to attosecond physics

Prof. Ferenc Krausz (LMU)

Applications for (better) Atomic Clocks

- Precision Spectroscopy
- Time and frequency metrology
- Clock synchronization over large distances
- Very long baseline interferometry (VLBI)
- Higher performance satellite navigation (Galileo)
- Precise tracking of remote space probes
- Telecommunication, network synchronization
- Variability of earth's rotation
- Geodesy with millimeter precision
- Pulsar periods
- Test of special and general relativity
- Check constancy of fundamental constants
-



Oktober 2005, Schellingstr. 4, LMU, München

Dezember 2005
Stockholm

