

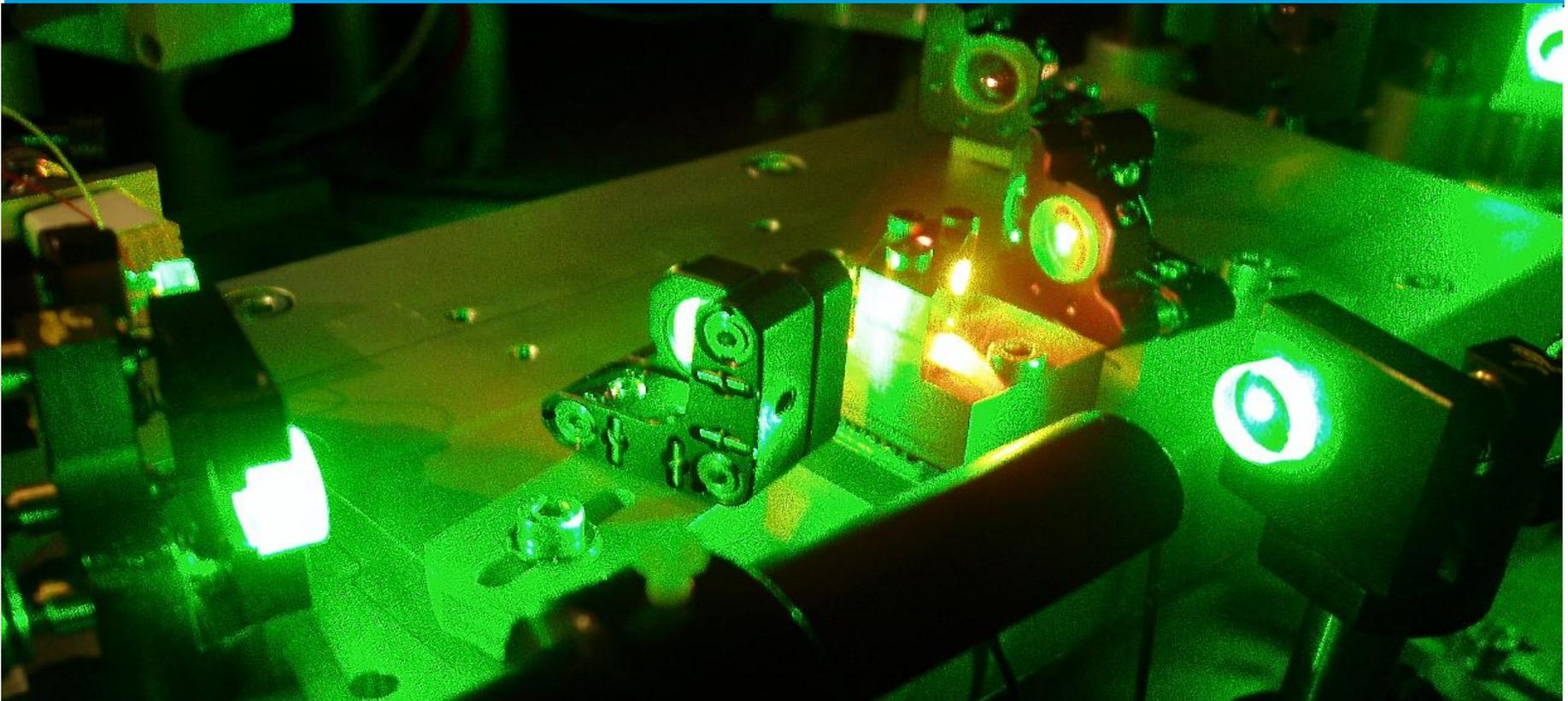
Der Laser – Einer für Alles?

Studium Generale, Universität Mainz



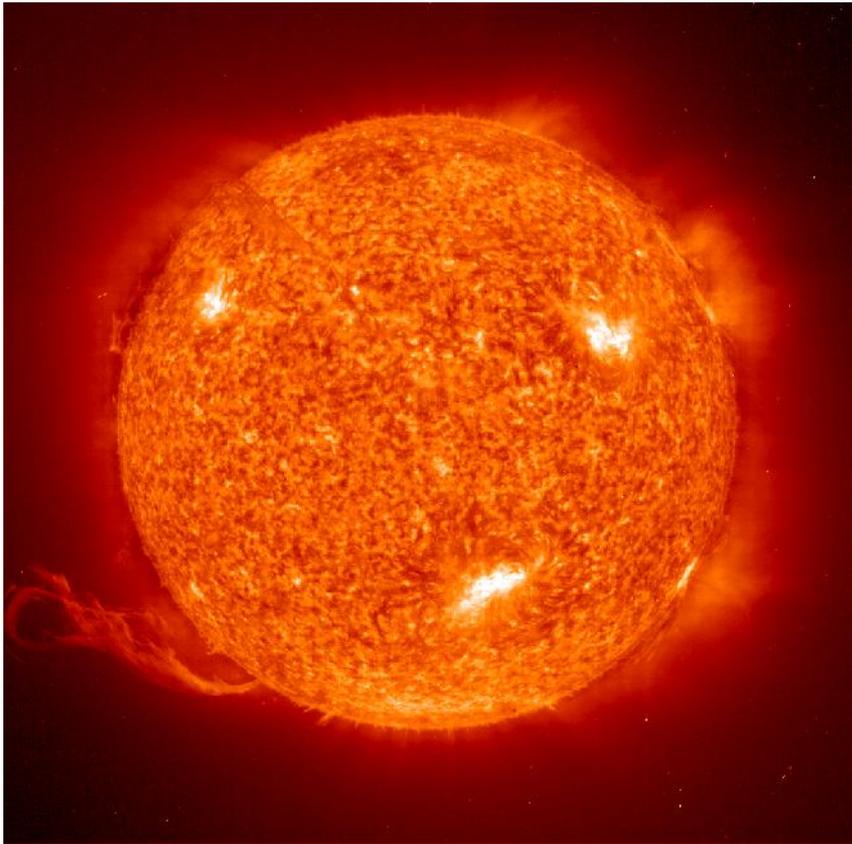
Thomas Walther

Laser und Quantenoptik - Institut für Angewandte Physik – TU Darmstadt



Wie entsteht Licht?

Temperatur



<http://www.mpi-hd.mpg.de/>



<http://www.seewetter-kiel.de/>

Wie entsteht Licht?

Lumineszenz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Gasentladung



Farbstoffzellen

Quantenphysik: Licht (Einstein 1917)

Absorption

Zur Quantentheorie der Strahlung.

Von A. Einstein¹⁾.

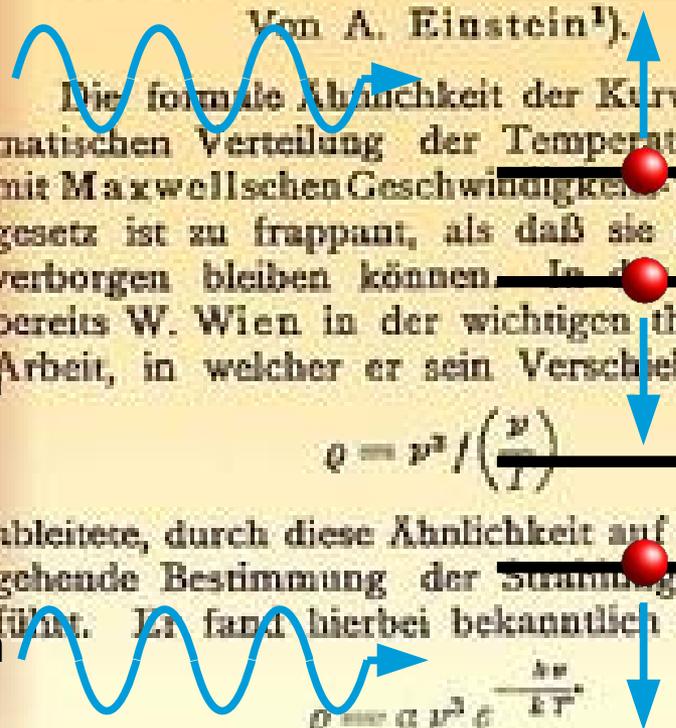
Die formale Ähnlichkeit der Kurve der chromatischen Verteilung der Temperaturstrahlung mit Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilungsgesetz ist zu frappant, als daß sie lange hätte verborgen bleiben können. In der Tat wurde bereits W. Wien in der wichtigen theoretischen Arbeit, in welcher er sein Verschiebungsgesetz

$$\rho = \nu^3 / \left(\frac{\nu}{T} \right) \quad (1)$$

ableitete, durch diese Ähnlichkeit auf eine weitergehende Bestimmung der Strahlungsformel geführt. Er fand hierbei bekanntlich die Formel

$$\rho = \alpha \nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (2)$$

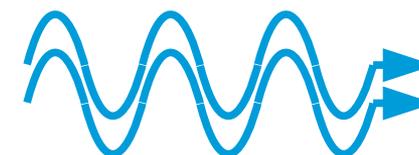
welche als Grenzgesetz für große Werte von



Spontane Emission



Stimulierte Emission



Der Laser ist möglich.....

- 1954 Erfindung des Masers durch Townes und Shawlow
- 1958 Übertragung in den optischen Bereich möglich



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 112, NUMBER 6

DECEMBER 15, 1958

Infrared and Optical Masers

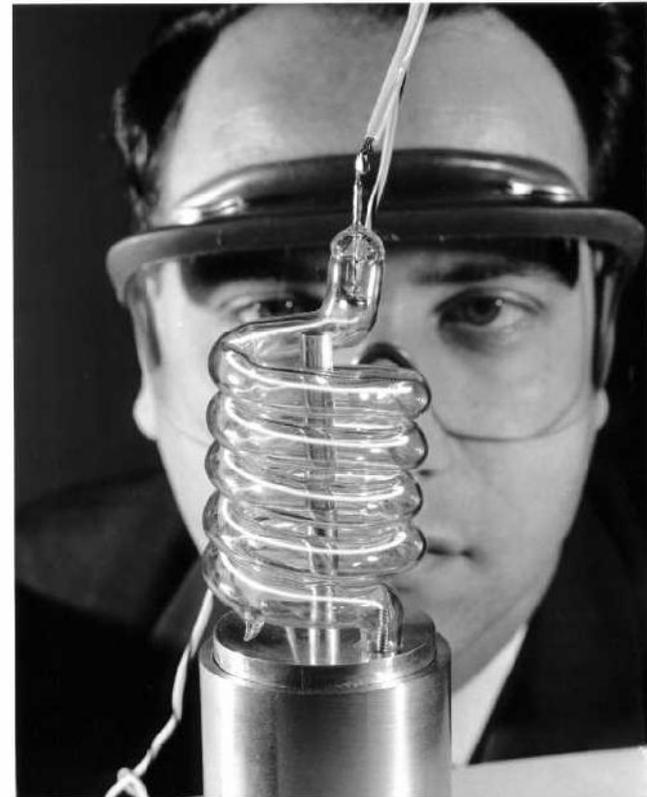
A. L. SCHAWLOW AND C. H. TOWNES*

Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey

(Received August 26, 1958)

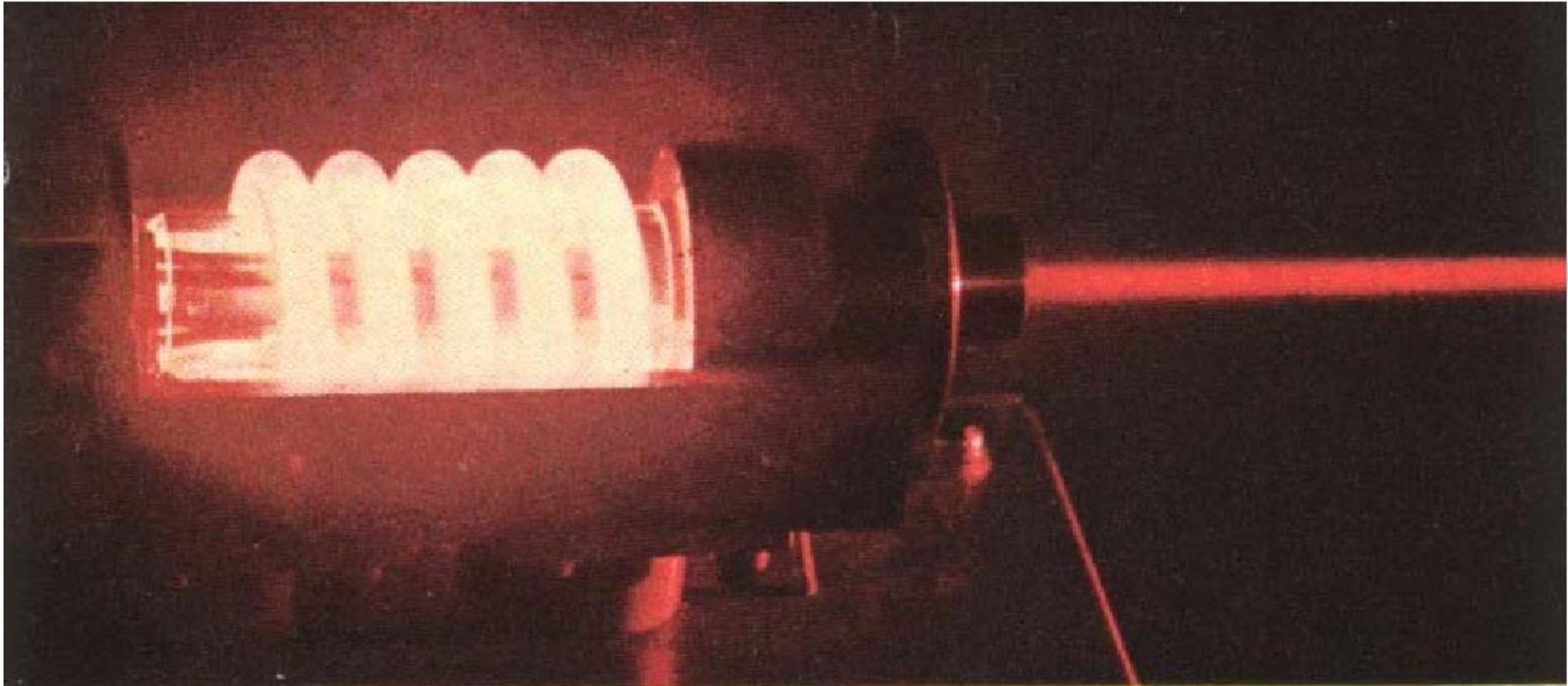
The extension of maser techniques to the infrared and optical region is considered. It is shown that by using a resonant cavity of centimeter dimensions, having many resonant modes, maser oscillation at these wavelengths can be achieved by pumping with reasonable amounts of incoherent light. For wavelengths much shorter than those of the ultraviolet region, maser-type amplification appears to be quite impractical. Although use of a multimode cavity is suggested, a single mode may be selected by making only the end walls highly reflecting, and defining a suitably small angular aperture. Then extremely monochromatic and coherent light is produced. The design principles are illustrated by reference to a system using potassium vapor.

16. Mai 1960 - Der erste Laser



Theodore Maiman
Erfinder des Rubinlasers (1960)

16. Mai 1960 – Der erste Laser

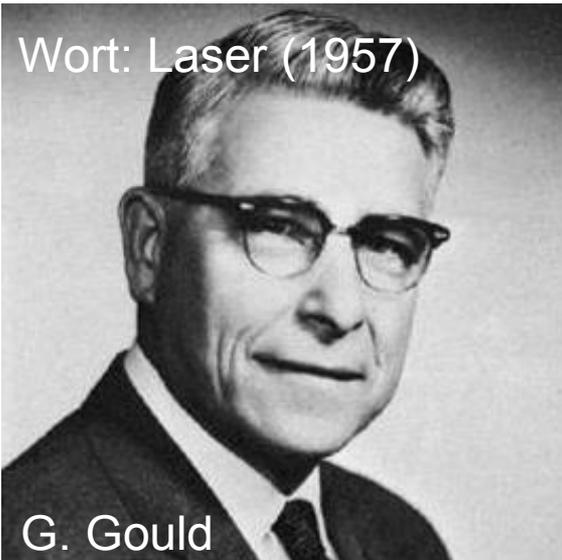


„A laser is a solution seeking a problem“
T. H. Maiman in the *New York Times*, 1964

Arthur Schawlow

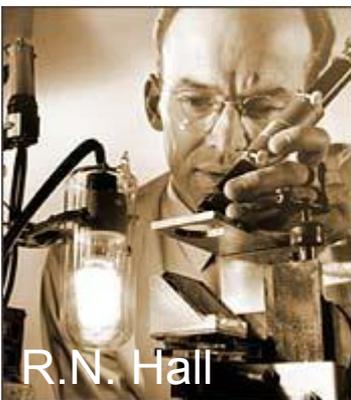
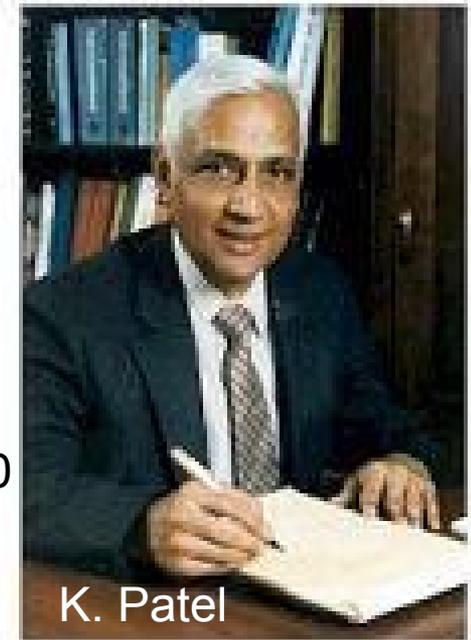


Die Zeit war reif...



Erfinder HeNe-Laser, 12.12.1960

Erfinder
CO₂ Laser 1964

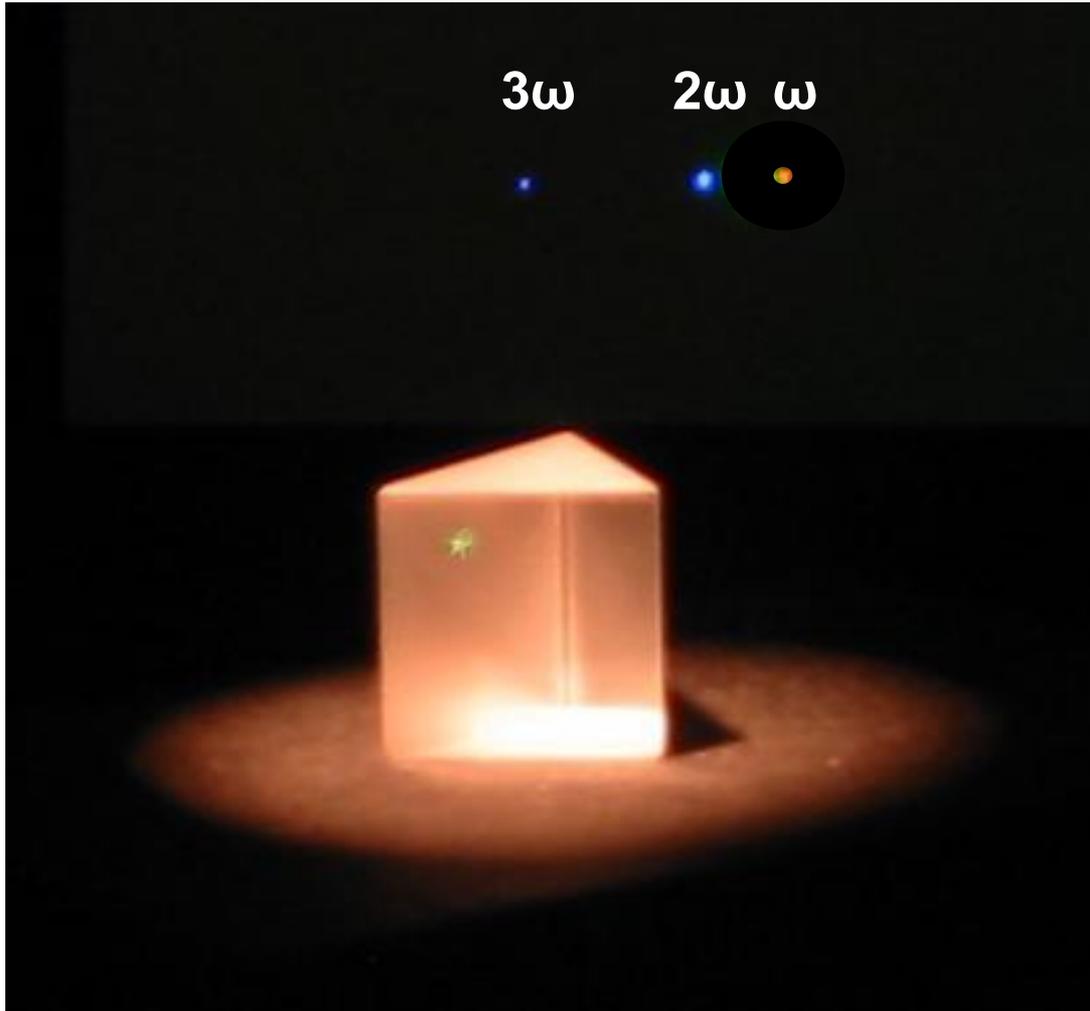


Erfinder
Halbleiterlaser, 1962



Erfinder des Festkörper- und
Faserlasers, 1961

Nicht-lineare Optik: Frequenzkonversion



- Hohe Lichtintensität des Lasers
- Damit große Feldstärke
- Nicht-lineare Effekte bei Wechselwirkung mit Materie
- Erzeugung der Harmonischen (z.B. Strahlung doppelter Frequenz)
- Analogie: Audio-Verstärker mit zu hoher Lautstärke

Erstmalige Veröffentlichung SHG



VOLUME 7, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

AUGUST 15, 1961

GENERATION OF OPTICAL HARMONICS*

P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich

The Harrison M. Randall Laboratory of Physics, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan

(Received July 21, 1961)

The development of pulsed ruby optical masers^{1,2} has made possible the production of monochromatic (6943 Å) light beams which, when focussed, exhibit electric fields of the order of 10^5 volts/cm. The possibility of exploiting this extraordinary intensity for the production of optical harmonics from suitable nonlinear materials is most appealing. In this Letter we present a brief discussion of the requisite analysis and a description of experiments in which we have observed the second harmonic (at ~ 3472 Å) produced upon projection of an intense beam of 6943 Å light through crystal-line quartz.

Table I. The square of the total p perpendicular to the direction of propagation of light through crystal-line quartz.

Direction of incident beam	The square of the total p perpendicular to direction of propagation
$x (E_x = 0)$	$p_y^2 + p_z^2 = 0$
$y (E_y = 0)$	$p_z^2 + p_x^2 = \alpha^2 E_x^4$
$z (E_z = 0)$	$p_x^2 + p_y^2 = \alpha^2 (E_x^2 + E_y^2)^2$

Franken, Hill, Peters, Weinreich, Phys. Rev. Lett. 7, (1961) 118

Erstmalige Veröffentlichung SHG

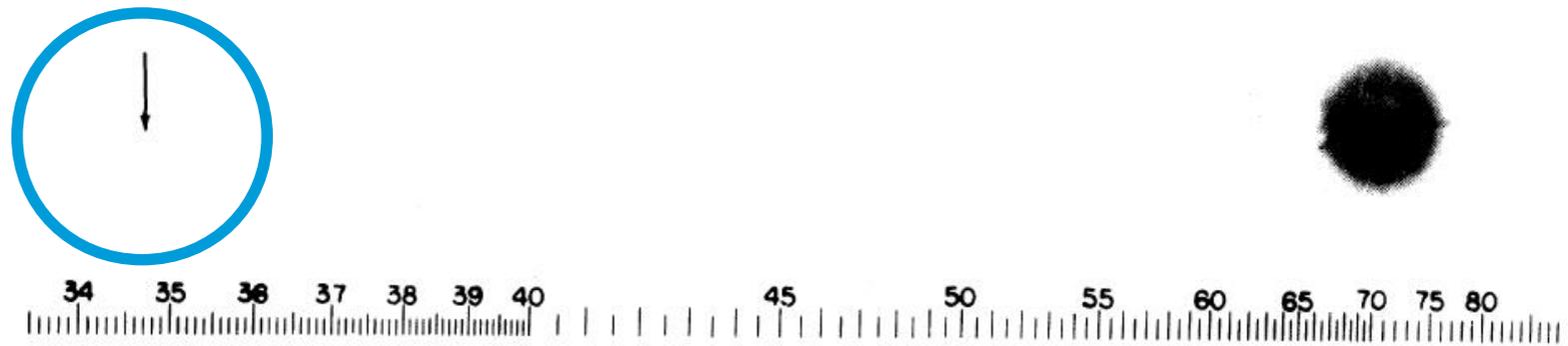


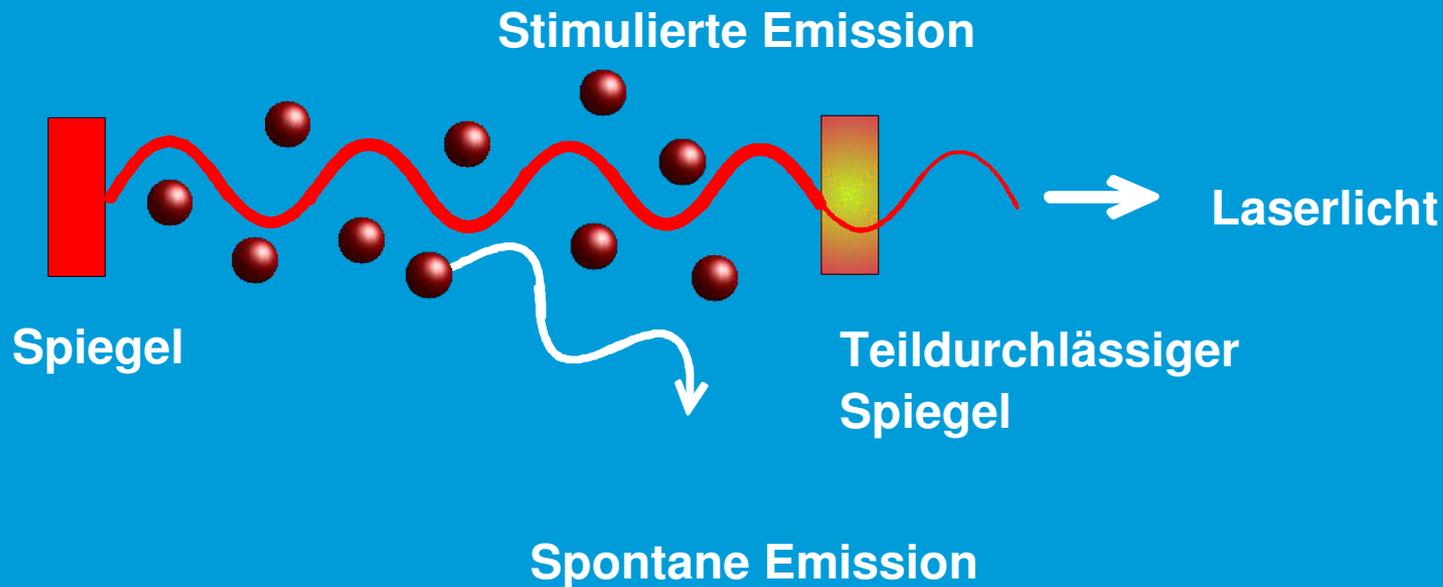
FIG. 1. A direct reproduction of the first plate in which there was an indication of second harmonic. The wavelength scale is in units of 100 Å. The arrow at 3472 Å indicates the small but dense image produced by the second harmonic. The image of the primary beam at 6943 Å is very large due to halation.

Der Pfeil bei 3472 Å zeigt auf das kleine,
aber intensive Bild, das von der zweiten
Harmonischen erzeugt wurde.

Franken, Hill, Peters, Weinreich, Phys. Rev. Lett. 7, (1961) 118

Funktionsweise des Lasers

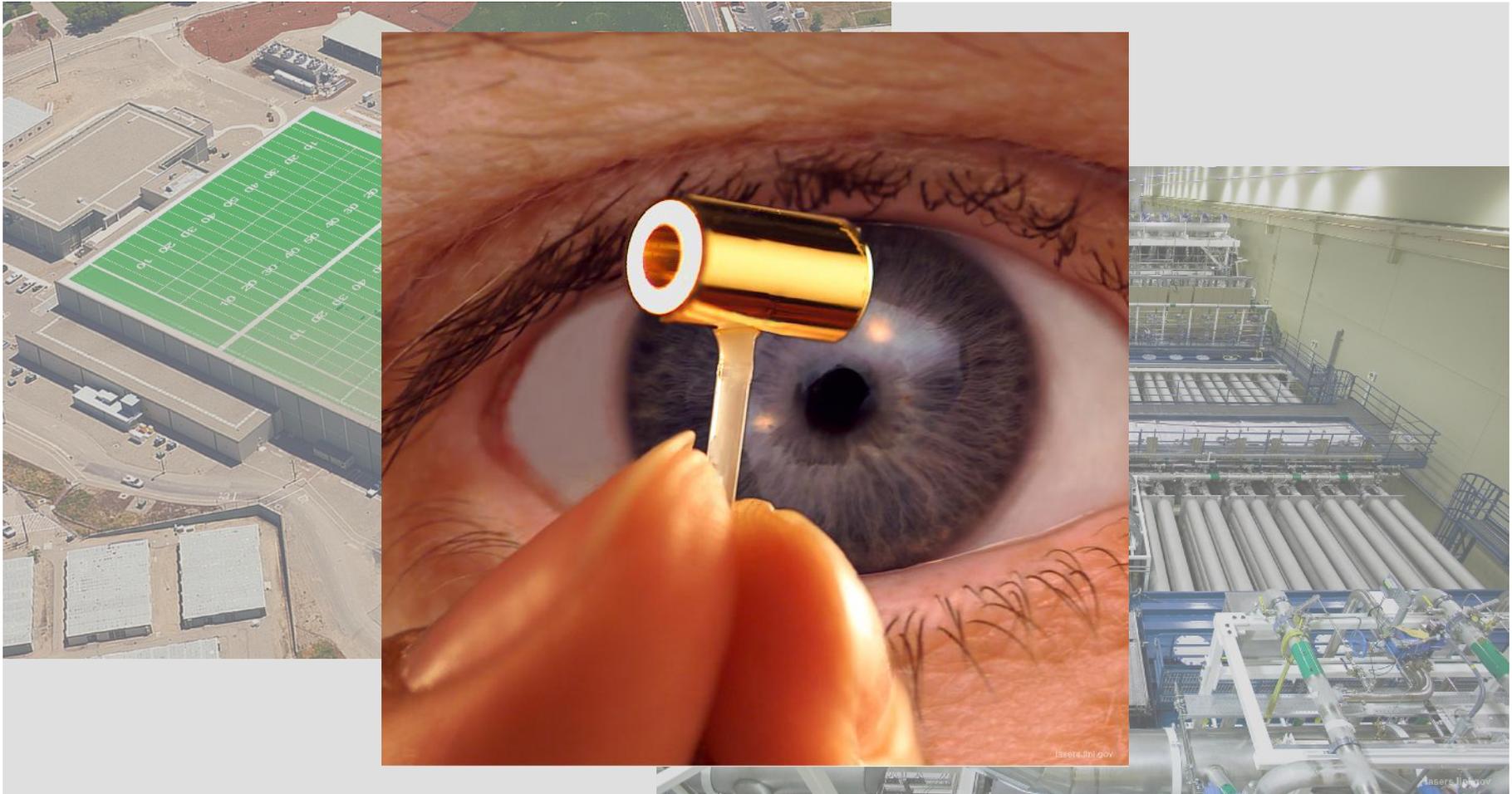
LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



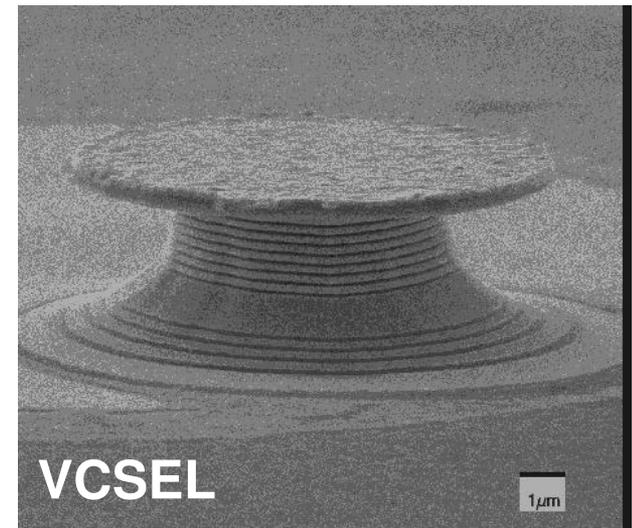
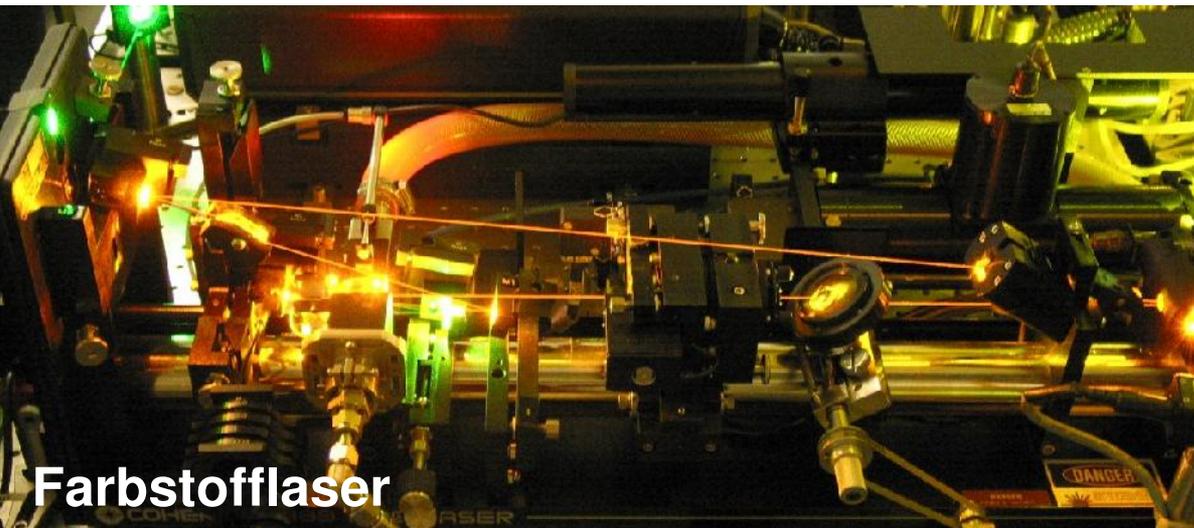
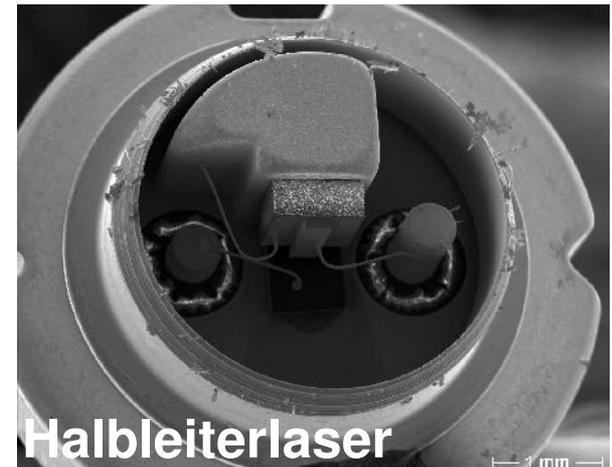
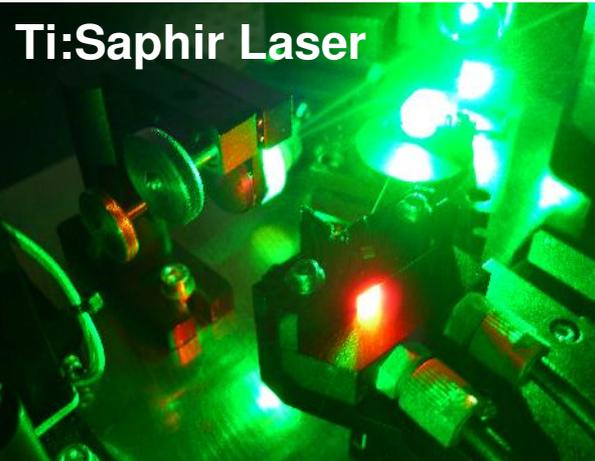
- **gerichtet** → **große Reichweite, hohe Leistungsdichte**
- **monochromatisch** → **Selektivität**
- **kohärent** → **spezielle Messmethoden**

Laser – von sehr gross ...

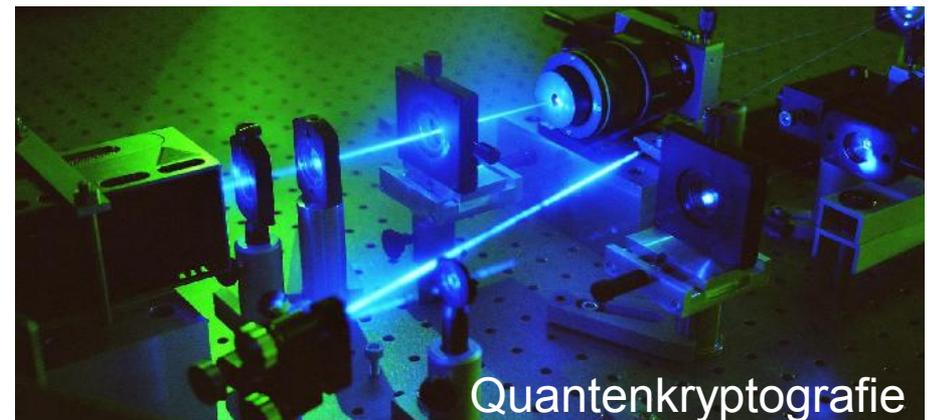
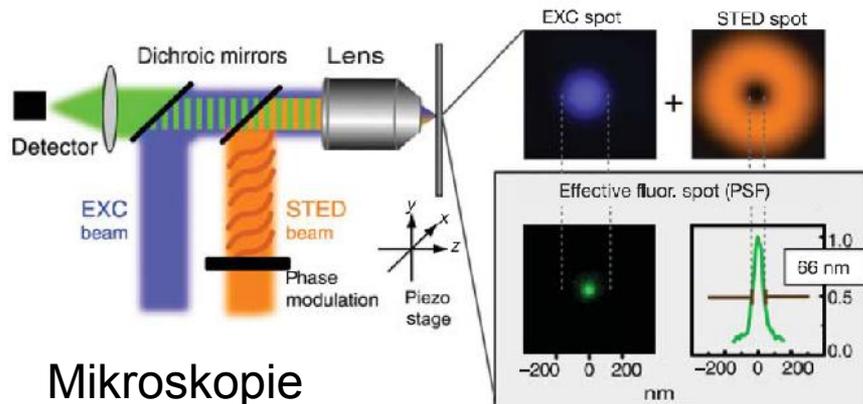
NIF, Lawrence Livermore National Laboratory, USA



... bis sehr klein



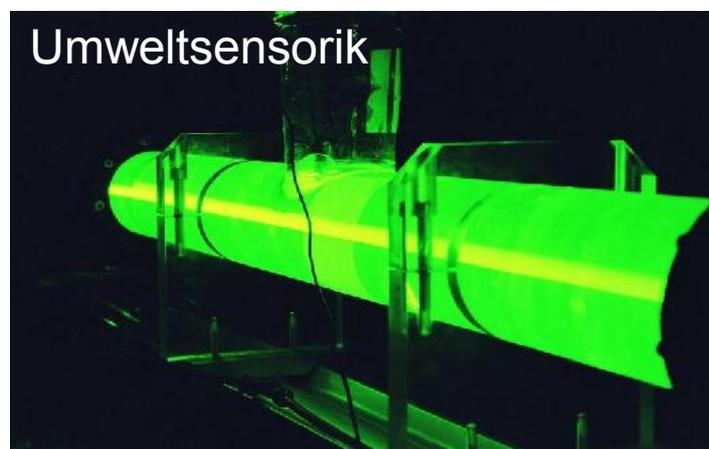
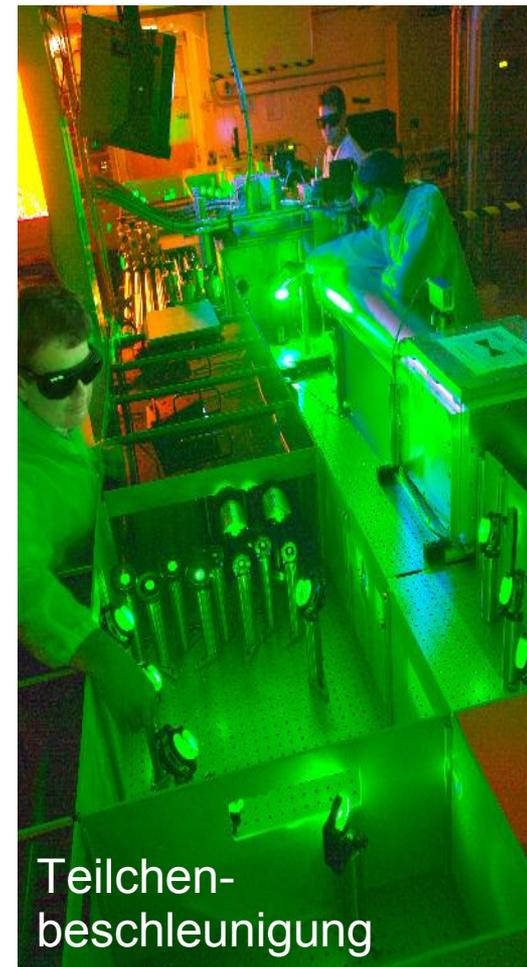
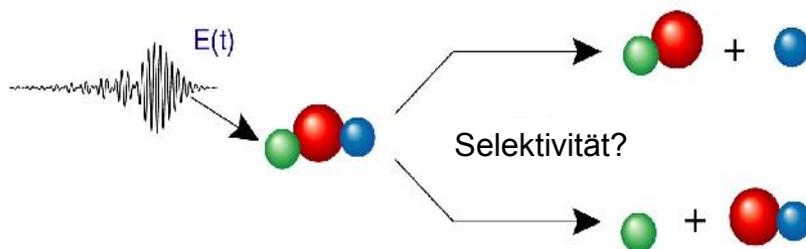
Anwendungen I



Anwendungen II

Kommunikation

Laser als Stroboskop/
Quantenkontrolle



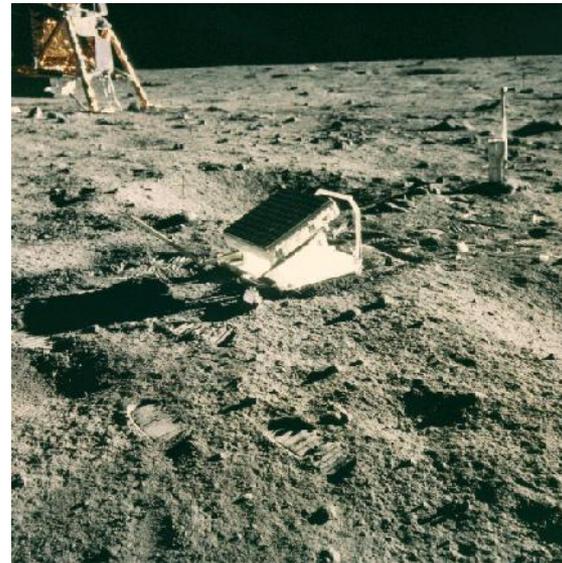
Laser im Alltag



ThW, H. Walther; *Was ist Licht?*,
Beck Wissen, 2. Auflage (2004)

LIDAR: Light Detection and Ranging

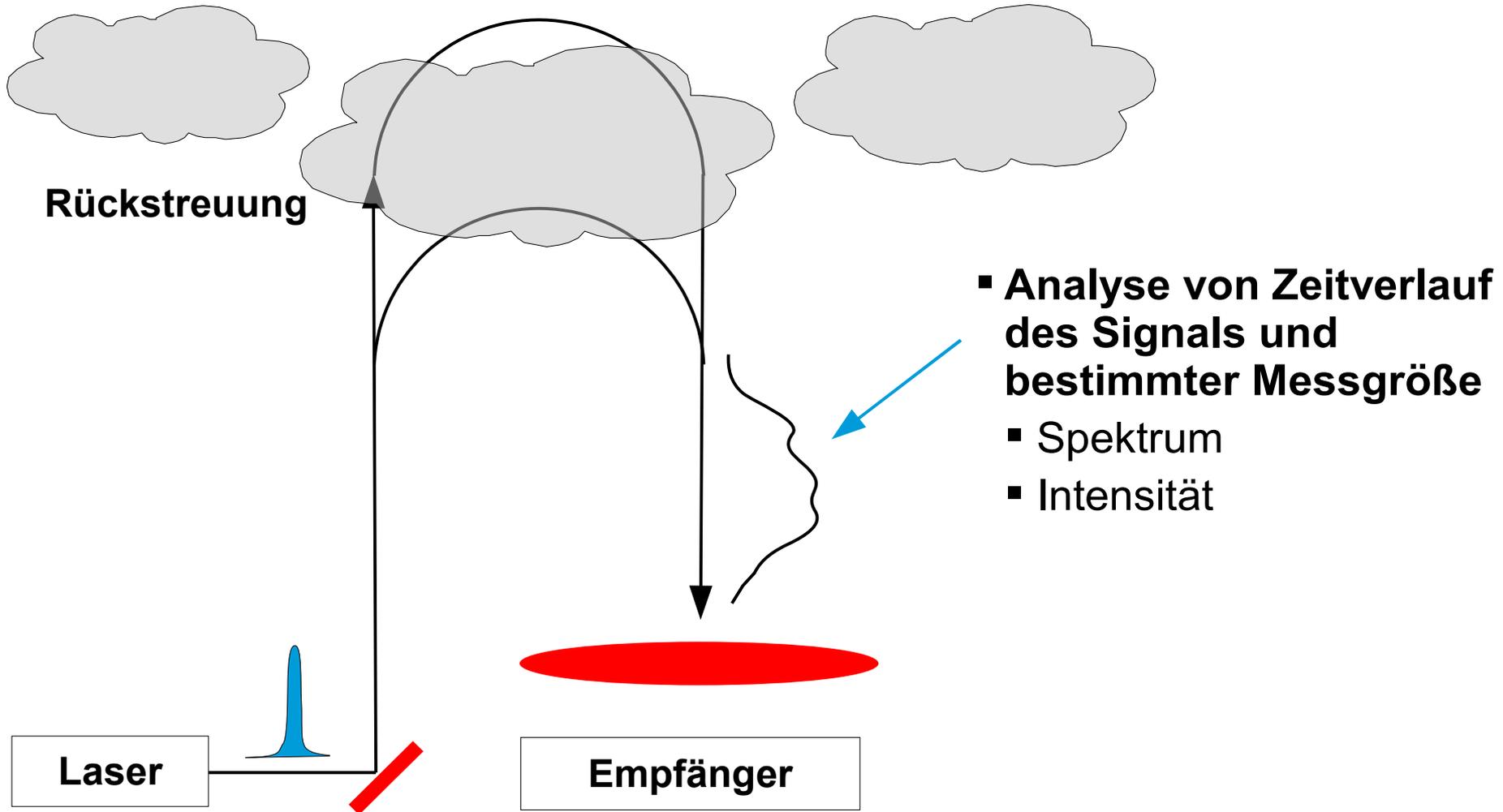
Telemetrie



<http://www.csr.utexas.edu/mlrs/>

http://www.lpi.usra.edu/expmoon/Apollo11/A11_Experiments_LRRR.html

LIDAR: Mehr als Entfernungsmessung



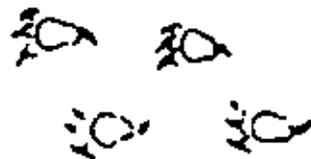
Das inverse Problem



Dragon



Tracks



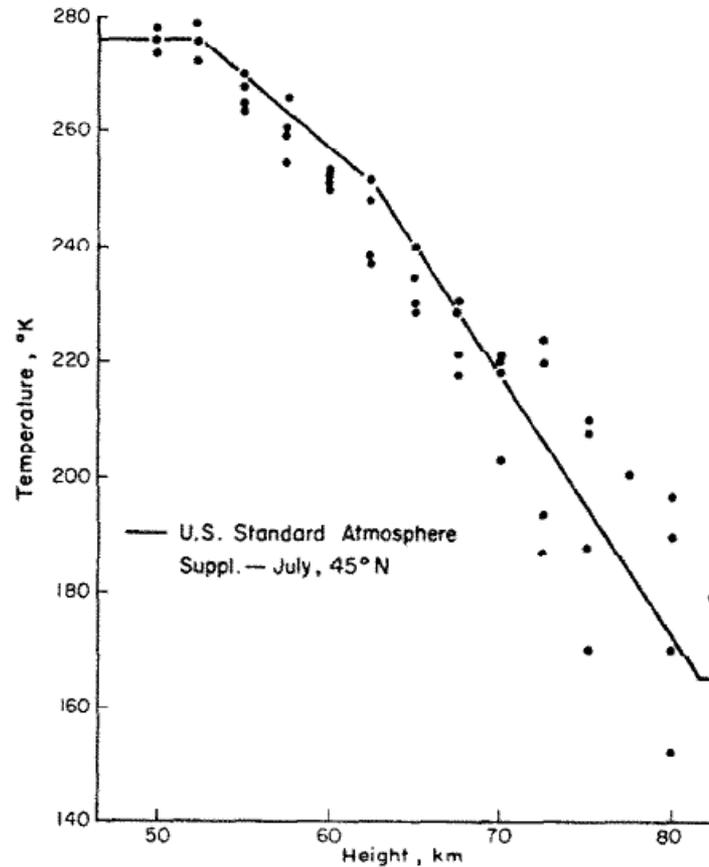
Tracks



Dragon

aus: Bohren, Huffman; Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley (1983)

LIDAR in der Atmosphäre



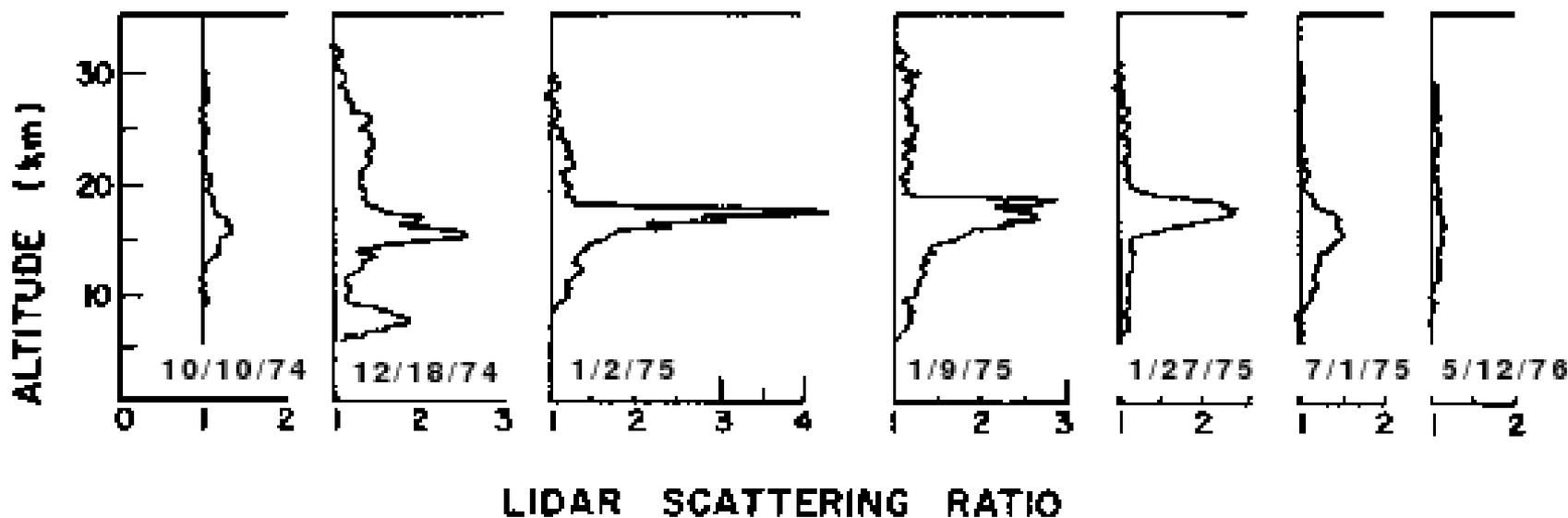
M.C.W. Sandford, J. Atm. and Terres. Phys. **29** (1967) 1657

G.S. Kent und R.W.H. Wright, J. Atm. and Terres. Phys. **32** (1972) 917

Vulkanasche

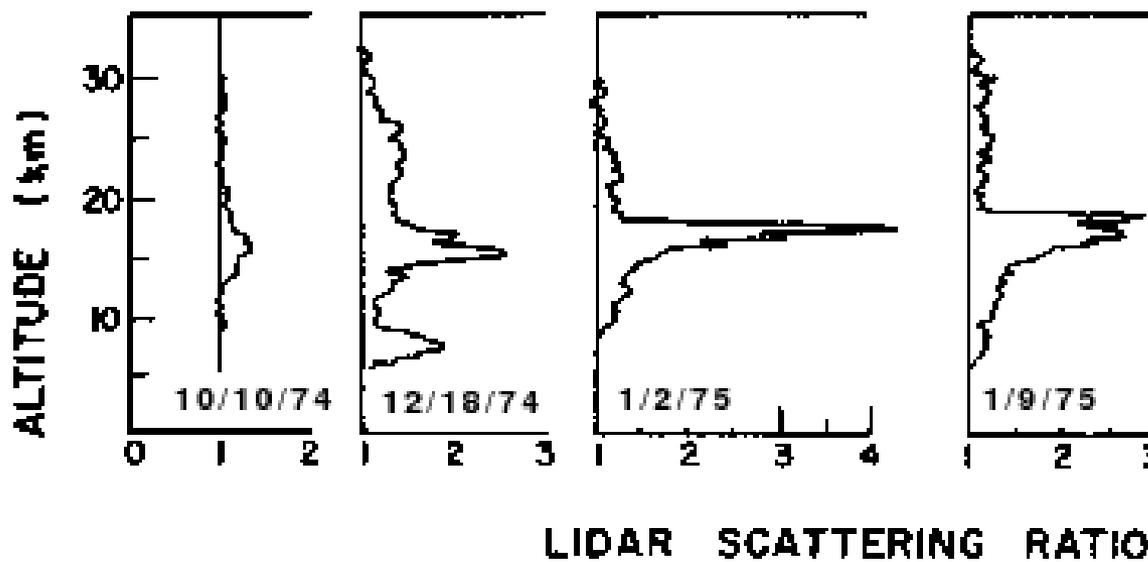


M.P. McCormick et al. ,
J. Atmospheric Sciences **35**, (1978) 1296



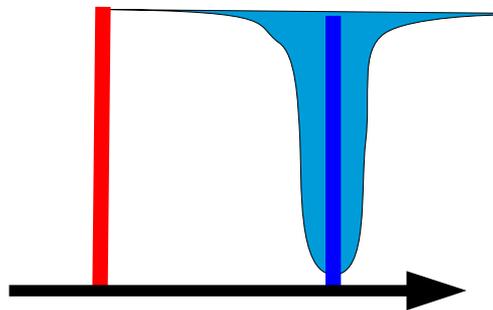
Vulkanasche

M.P. McCormick et al. ,
J. Atmospheric Sciences **35**, (1978) 1296



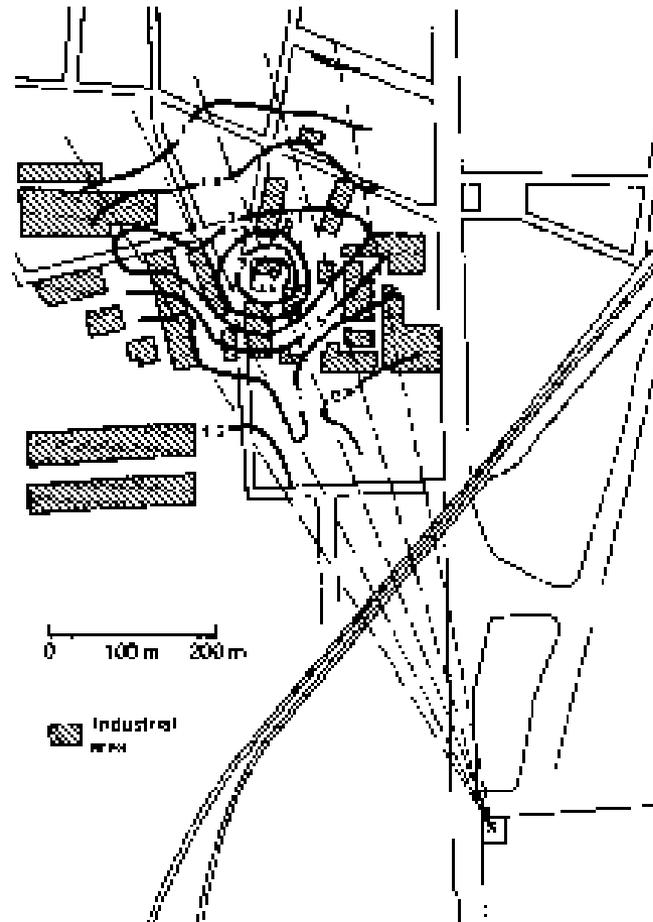
DIAL: Schadstoffkonzentrationen

Kontrolle von Emissionen und Luftverschmutzung



Wellenlänge

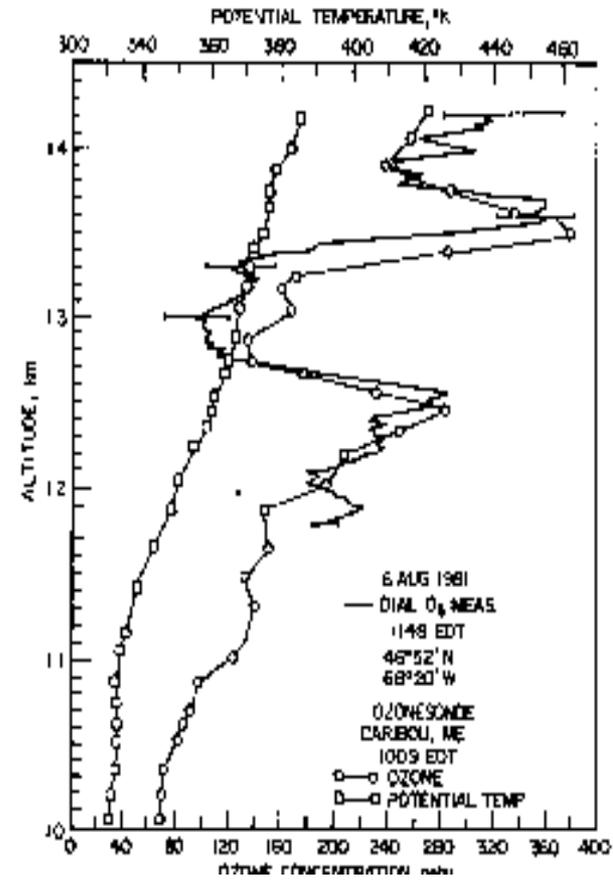
Prinzip der
Differenziellen Absorption



K.W. Rothe et al. ,
Appl Phys. 3, (1974) 115

DIAL: Ozonmessungen

- Ozonschicht schützt vor UV Strahlung
- „Ozonloch“
- Verteilung des Ozons mit der Höhe



E.V. Browell, Proc. Workshop on Opt. and Rem. Sensing, Monterey, Feb. 9-11 1982

LIDAR in der Atmosphäre: Ozon



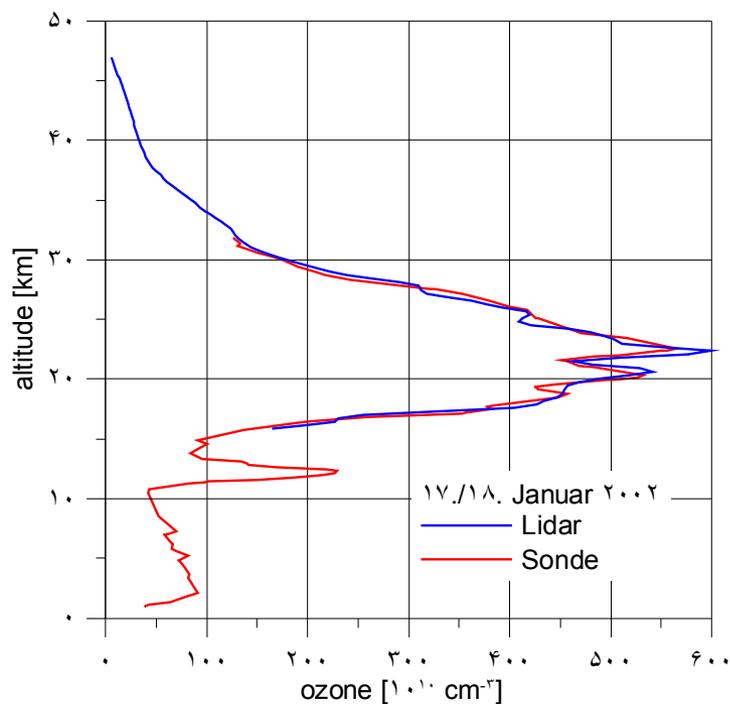
80er Jahre

Aus: ThW, H. Walther;
Was ist Licht?,
Beck Wissen, 2. Auflage (2004)

LIDAR – Ozonprofilmessung

DWD-Hohenpeissenberg - Routineozonprofilmessungen (seit 1987)

Resultate



UV Absorptions-DIAL



Courtesy of Dr. Steinbrecht, Deutscher Wetterdienst, Hohenpeissenberg

fs-LIDAR: Plasmakanäle als Weisslichtquelle zur Fernerkundung



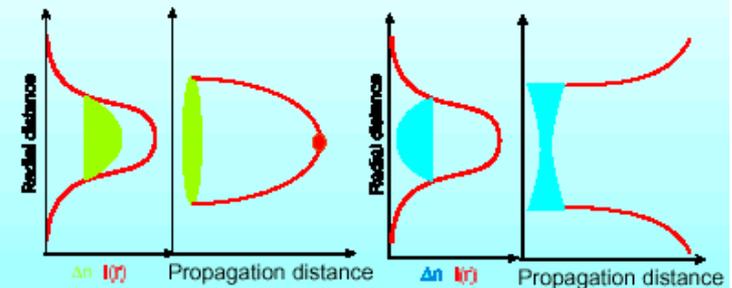
Courtesy of J.P. Wolf, L. Wöste, R. Sauerbrey

<http://pclasim47.univ-lyon1.fr/teramobile.html>

Mechanism for channel formation

Kerr effect focuses
 $\Delta n = n_2 I$

Ionization defocuses
 $\Delta n = -N_e(l) / 2N_{cr}$



fs-LIDAR II: „Blitzableiter“




3m

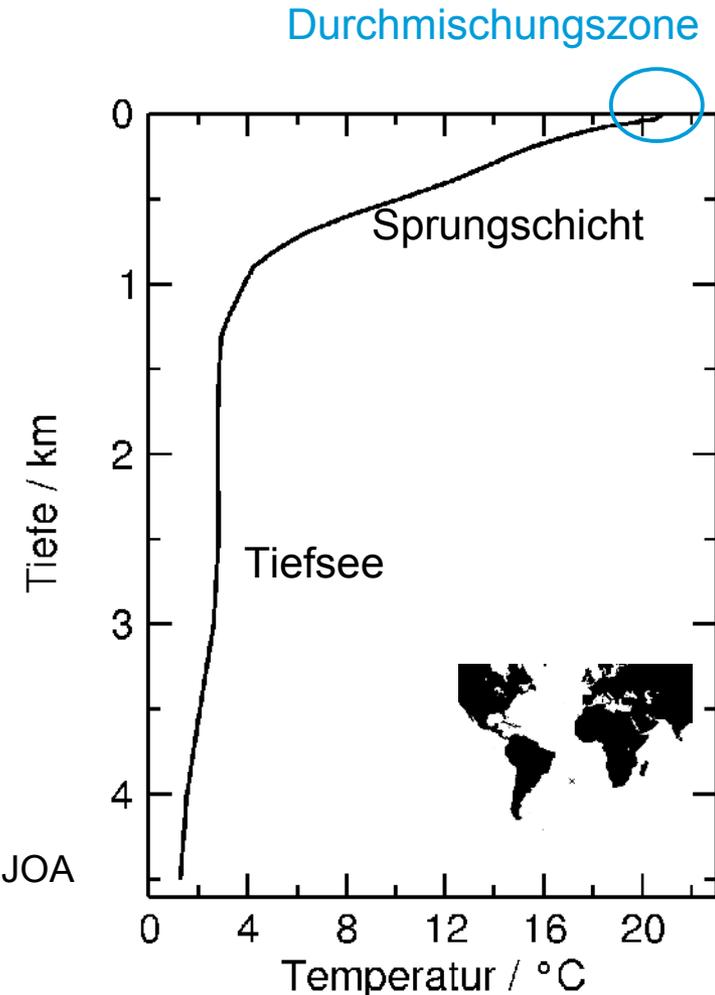
Courtesy of J.P. Wolf, L. Wöste, R. Sauerbrey

<http://pclasim47.univ-lyon1.fr/teramobile.html>

Temperaturverteilung im Ozean

- **Charakteristische Schichten**
 - Durchmischungszone
 - Sprungschicht
 - Tiefsee
- **Interessanter Bereich bis ca. 10-200 m**
 - Klimaforschung:
Ozean – Atmosphärenkopplung
 - Ozeanographie:
Dynamik der Durchmischungszone

Quelle: JOA

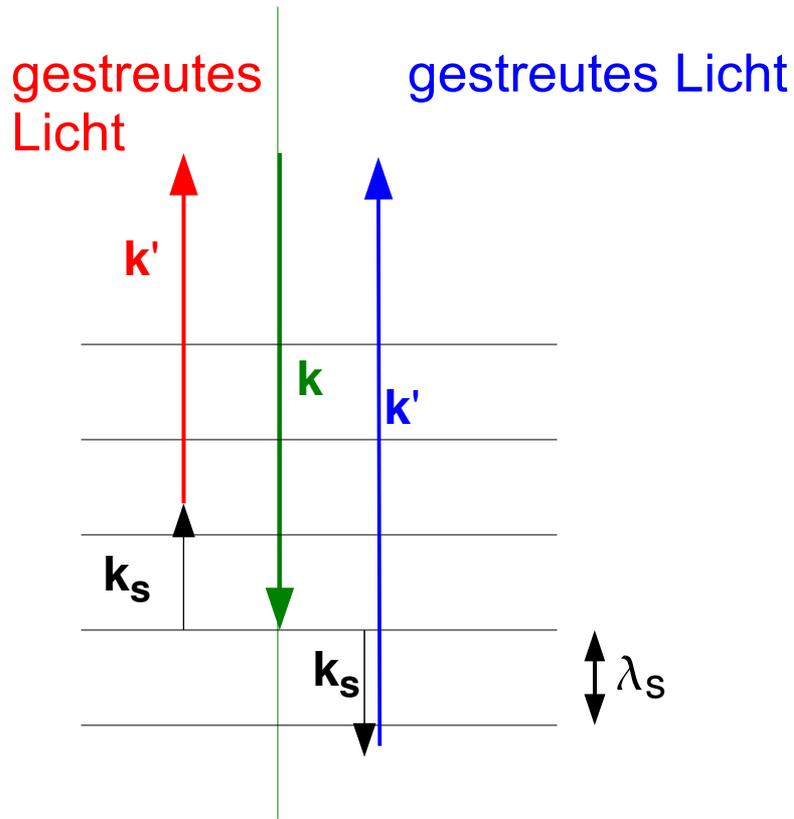


Temperaturverteilung im Ozean

- **Charakteristische Schichten**
 - Durchmischungszone
 - Sprungschicht
 - Tiefsee
- **Interessanter Bereich bis ca. 10-200 m**
 - Klimaforschung:
Ozean – Atmosphärenkopplung
 - Ozeanographie:
Dynamik der Durchmischungszone
- **Kontaktbasierte Messverfahren**
- **Berührungsloses Verfahren
wünschenswert (Brillouin LIDAR)**



einfallender Strahl



- Warum tritt der Effekt auf?
 - Dichtefluktuationen, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten
 - Streuung an einem „Gitter“ ähnlich wie bei der Kristallbeugung
 - Doppler-Effekt

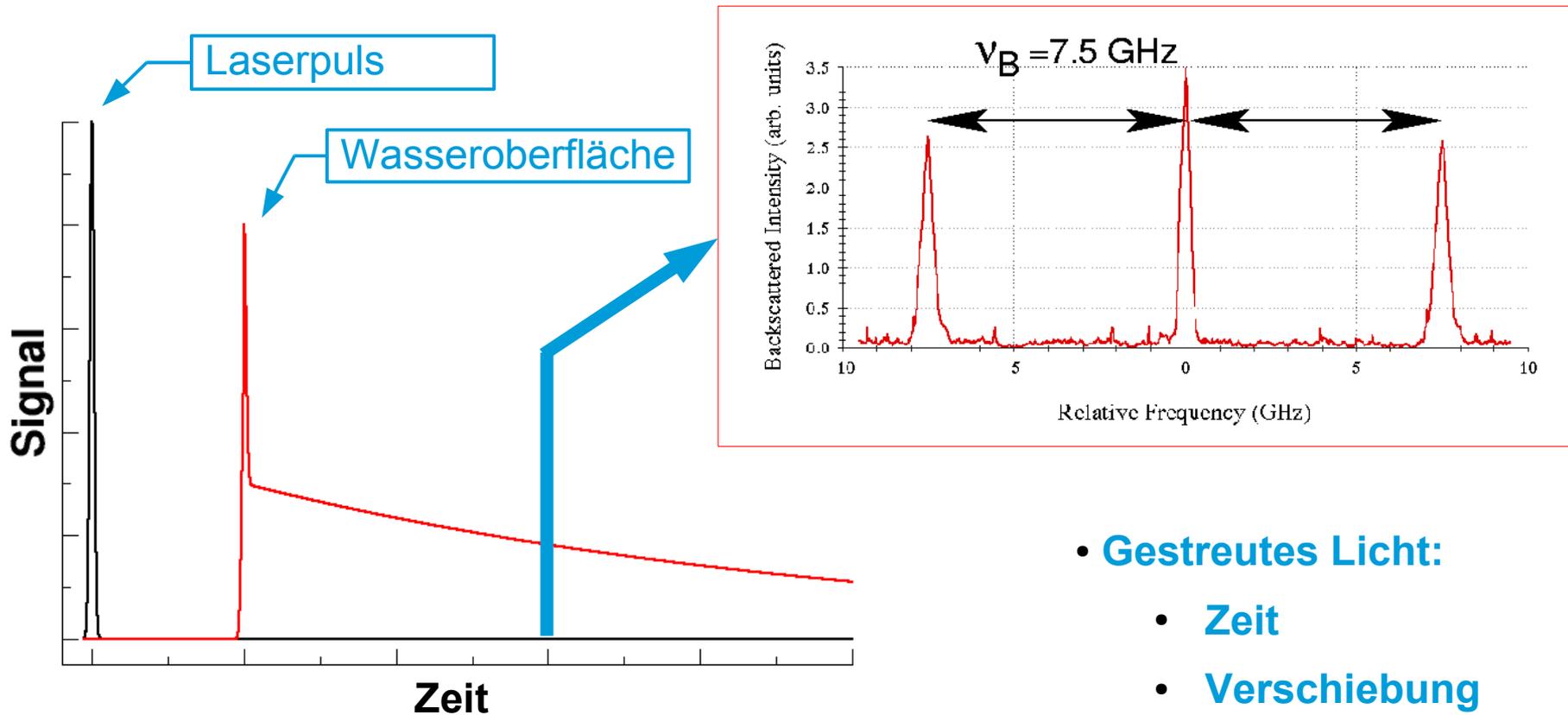
$$\nu_B(S, T, \lambda) = \pm \frac{2n(S, T, \lambda)}{\lambda} \nu_S(S, T)$$

Frequenzverschiebung $\nu_B = \pm 7.5 \text{ GHz}$

Dichtefluktuationen = „Schallwellen“

Anforderungen

- Gepulster, stabiler Laser
- Spektrale- und zeitliche Auflösung des Detektionssystems



- **Gestreutes Licht:**
 - **Zeit**
 - **Verschiebung**

“Labor”-Ozean

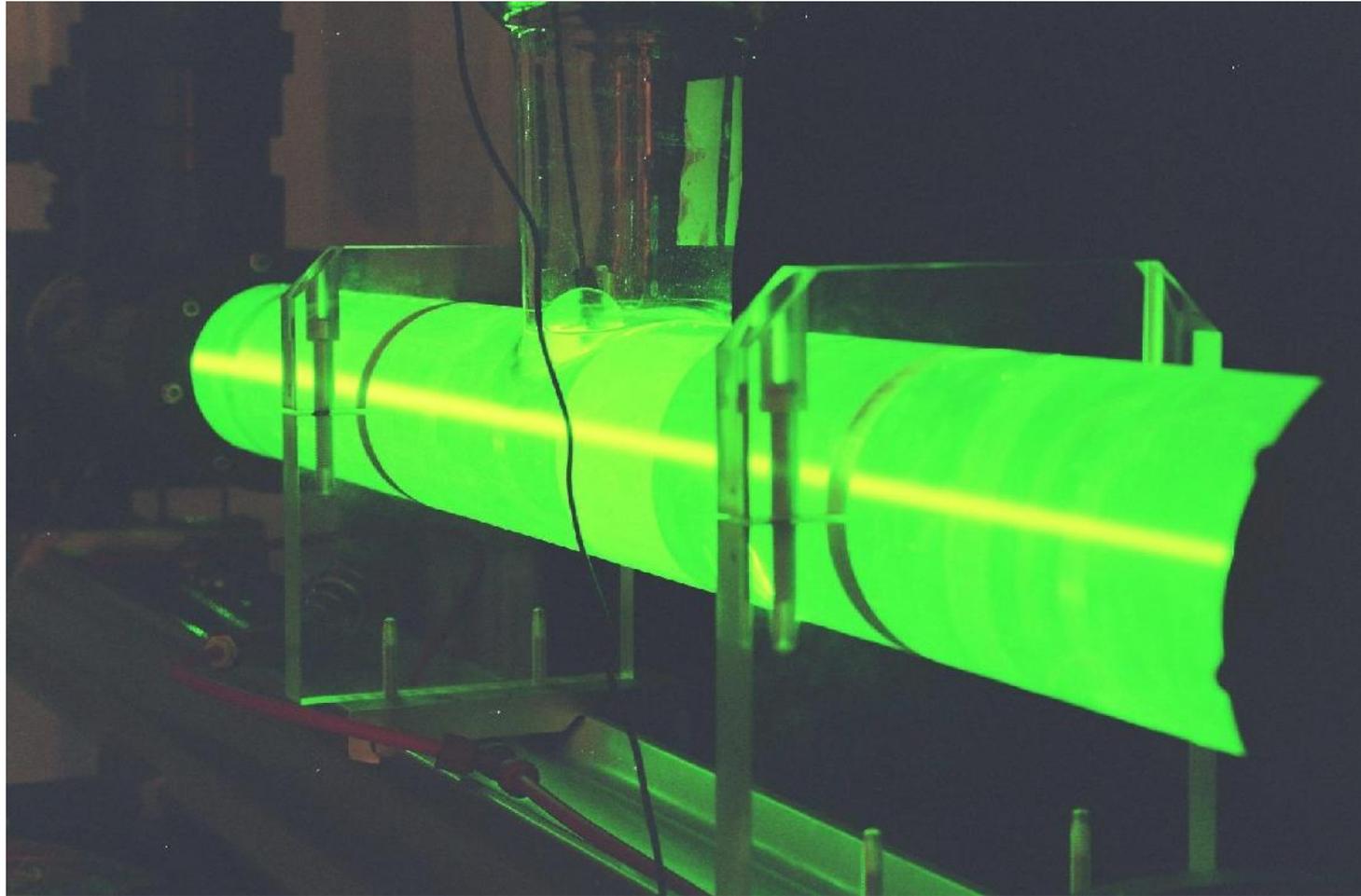
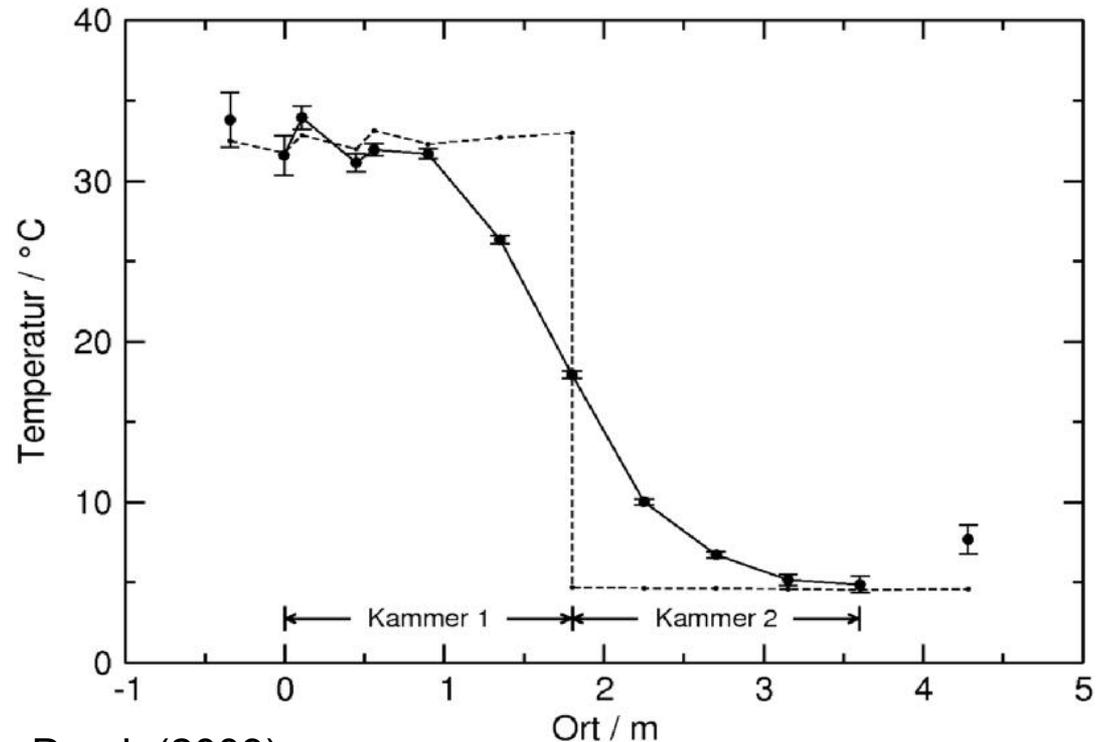


Photo: Andreas Buhr

Status und Ergebnisse

- **Prinzipielle Funktionsweise gezeigt**
- **Lichtquelle erfüllt Anforderungen**
- **Tiefenaufgelöste Messungen möglich**



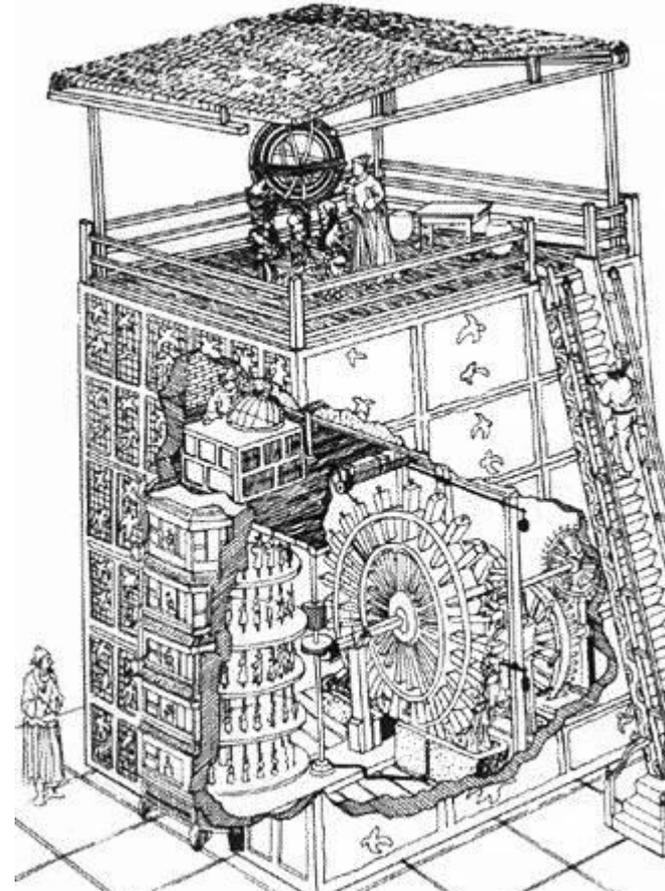
- **"Zeit ist, was verhindert, dass alles auf einmal passiert!"
(John A. Wheeler)**

Der Laser als Uhr?

- Was ist eine Uhr?
 - Vergleich einer Zeitdauer mit dem „Ticken“ einer Uhr
 - Je kürzer das „Ticken“ desto höher die Genauigkeit der Uhr
 - Je länger ich das „Ticken“ beobachte, desto genauer kenne ich es
 - Zur Messung der Genauigkeit, werden mehrere Uhren gebraucht.

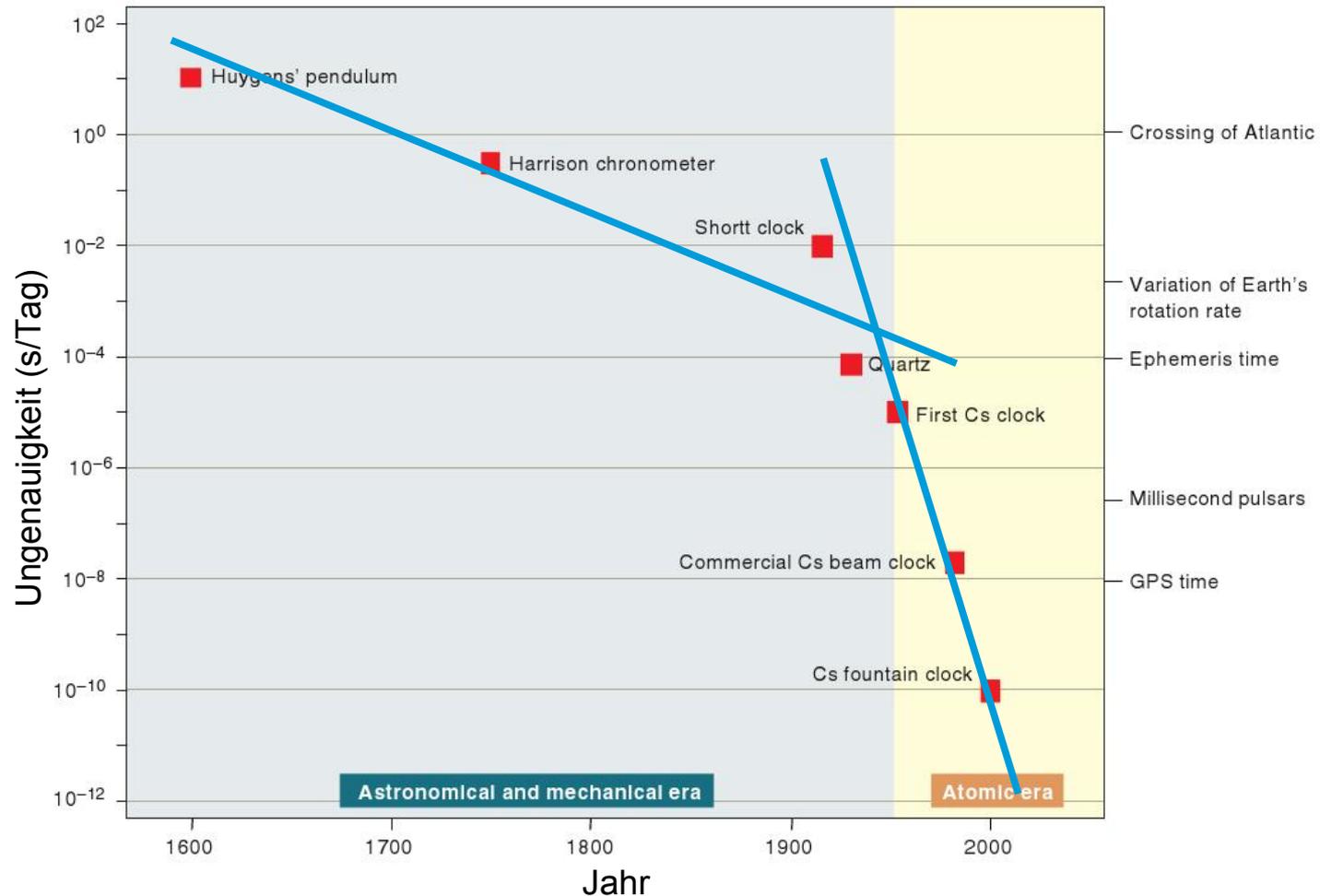


- **Vergleich von Zeitdauern**
 - **Mit astronomischen Vorgängen**
 - z.B. Dauer eines Jahres
 - Dauer des Tages
 - Sonnenuhr
 - **Mit reproduzierbaren Vorgängen**
 - Sanduhr
 - Wasseruhr
 - Pendeluhren



Wasseruhren (Beispiel: Su Sung Wasseruhr, 1090)

Entwicklung und Genauigkeit der Uhren



S. A. Diddams, J. C. Bergquist, S. R. Jefferts, C. W. Oates, Science **306** (2004) 1318

1955: Erste Atomuhr

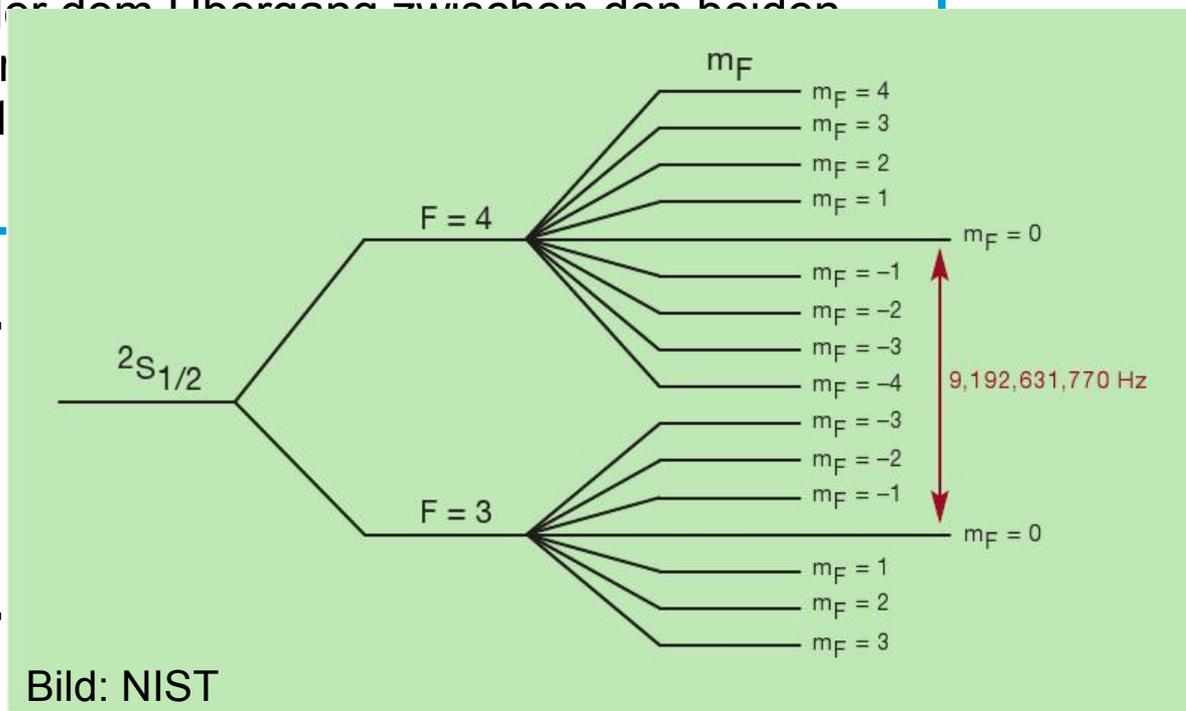
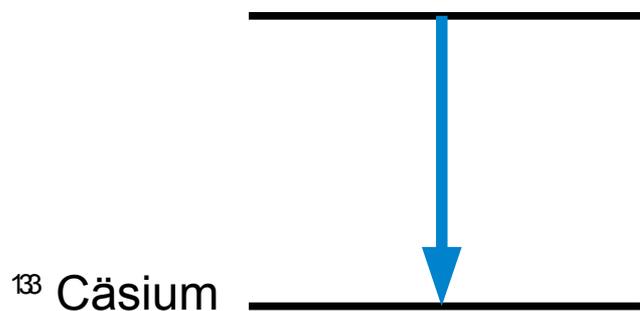


Louis Essen

Sekunde

Definition der Sekunde seit 1967:

Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur des Nuklids Cs-1



Warum noch genauer?

■ GPS

- Basiert auf Synchronisation von Uhren
- Laufzeit
- Effekte der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie müssen berücksichtigt werden

■ Datenraten in der Telekommunikation

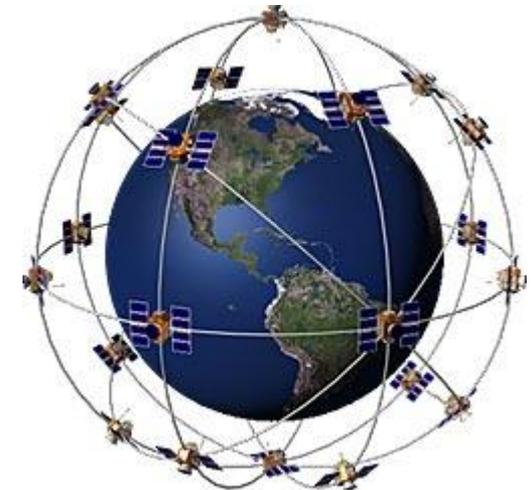
■ Test fundamentaler Theorien

- Quantenelektrodynamik
- Allgemeine Relativitätstheorie

■ Konstanz der Naturkonstanten

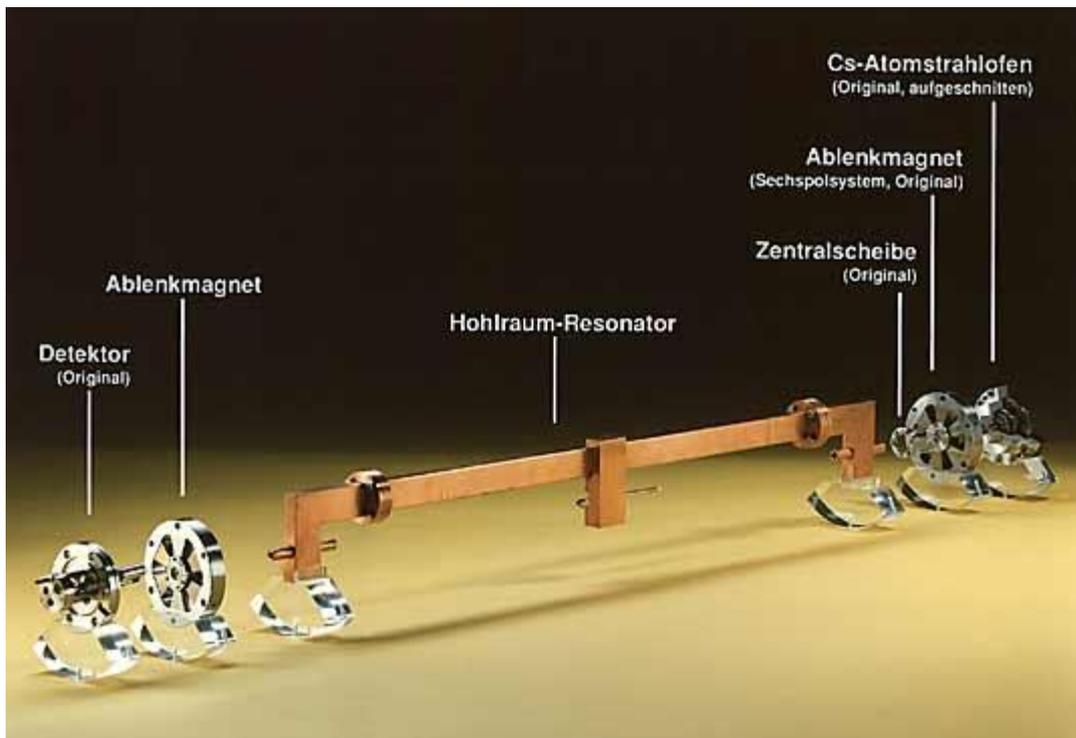
- Hatten sie schon immer den Wert, den wir heute beobachten?

■ Geodäsie



Wie funktioniert eine Atomuhr?

Beispiel: Cs-Uhr



Quelle: PTB

- Mikrowellengenerator wird auf Übergang im Cs „stabilisiert“
- Lange Flugstrecke = lange Beobachtungszeit

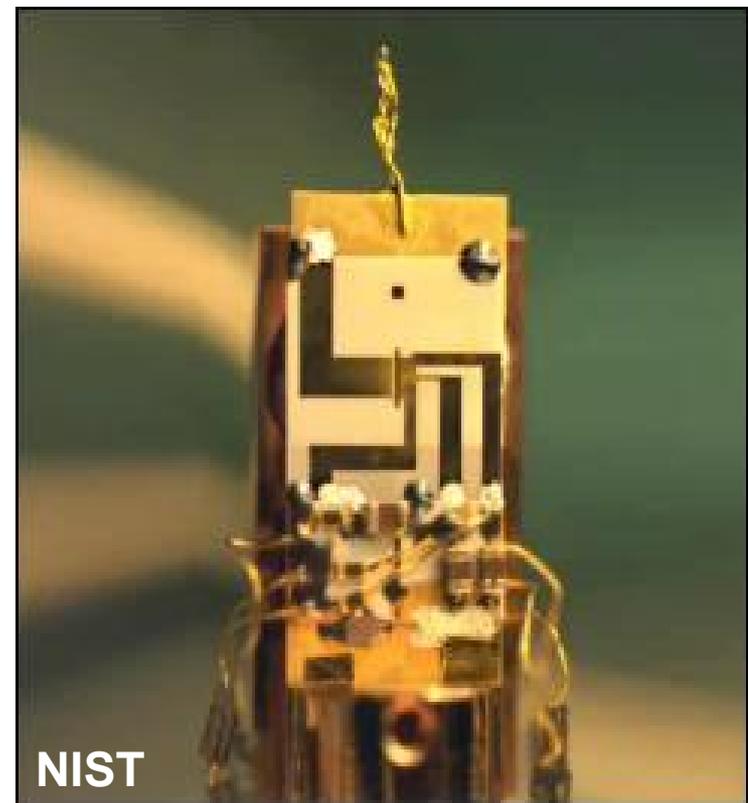
Wo hilft der Laser?

- Fangen und Kühlen ermöglicht lange Beobachtungszeiten

Magneto-Optische Falle: Neutrale Atome



Paulfalle: Ionen



Reduktion in der Größe



Bild: PTB



„Springbrunnenuhr“

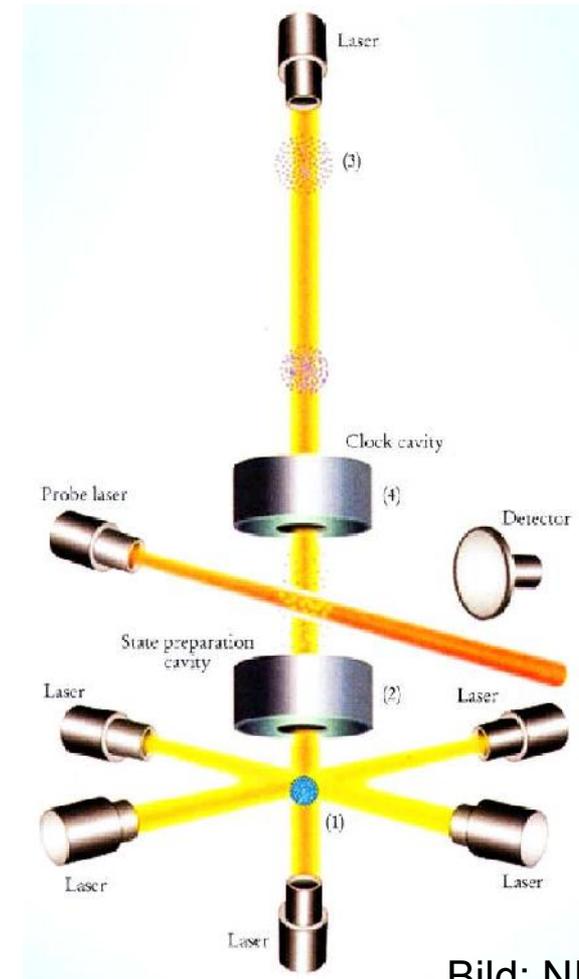


Bild: NIST

Bestandteile einer Atomuhr

- **Referenz**
 - Atomarer Übergang mit hoher Frequenzschärfe
- **Oszillator**
 - Wird stabil und resonant zum Übergang gehalten
- **Messung**
 - Oszillatorfrequenz wird gemessen (Länge des „Tickens“)

- **Bisher:**
 - Referenz: Übergang in Cäsium
 - Oszillator: Mikrowellengenerator
 - Messung: herkömmliche Hochfrequenzmessung

Wo bringt der Laser Vorteile?

▪ Voraussetzung

- Reproduzierbarkeit
- „Signal-Rausch“-Verhältnis (deutliche Signale)

▪ Entscheidende Grösse

$$\text{Fraktionelle Unsicherheit} = \frac{\Delta f}{f}$$

▪ Je kleiner die fraktionelle Unsicherheit, desto genauer die Uhr

▪ Mögliche Strategien:

▪ Erniedrigung der Unsicherheit der Frequenzmessung Δf

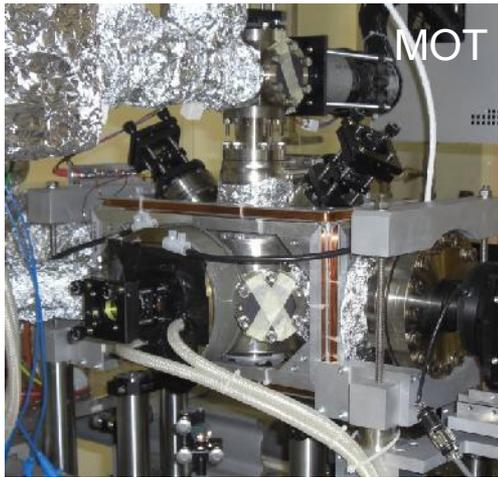
- Hohe Auflösung (lange Beobachtungszeit, hohe Präzision)
- Meta-stabile Zustände (lange Lebenszeit, d.h. meta-stabile Zustände)

▪ Erhöhung der Übergangsfrequenz f

- **Optische Frequenzen**

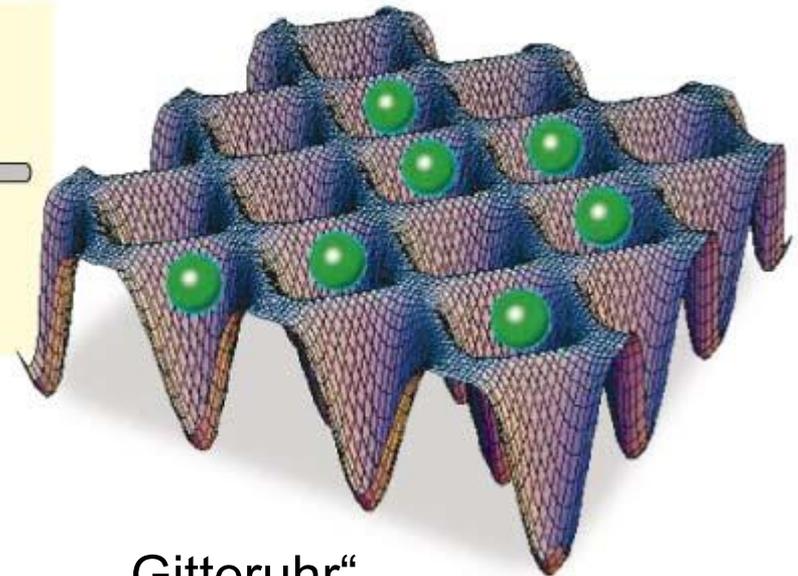
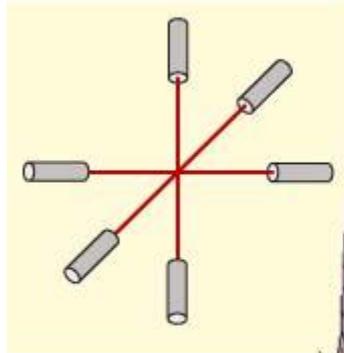
▪ Mögliche Kandidaten (Auszug): Yb, Sr, Hg, Al⁺, Mg⁺, Hg⁺, Yb⁺, ...

Darmstadt: Ziel Gitterfalle mit neutralem Hg



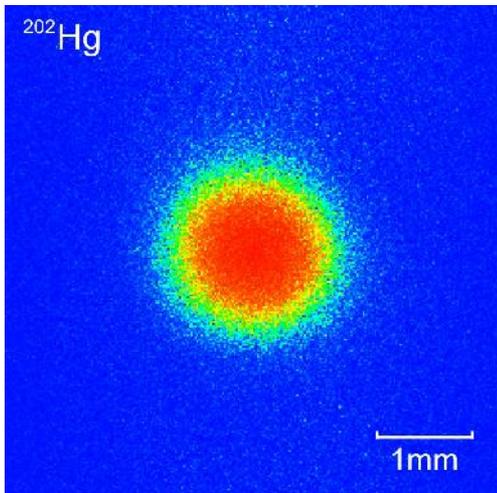
OPTICAL LATTICE CLOCK

Six laser beams create a pattern of standing waves that traps strontium atoms in energy wells. The trapping laser frequency is one that does not interfere with the atoms, which tick at about 429 terahertz, providing unsurpassed timekeeping accuracy



„Gitteruhr“

SOURCE: NATURE



Metrologie: Frequenzkette

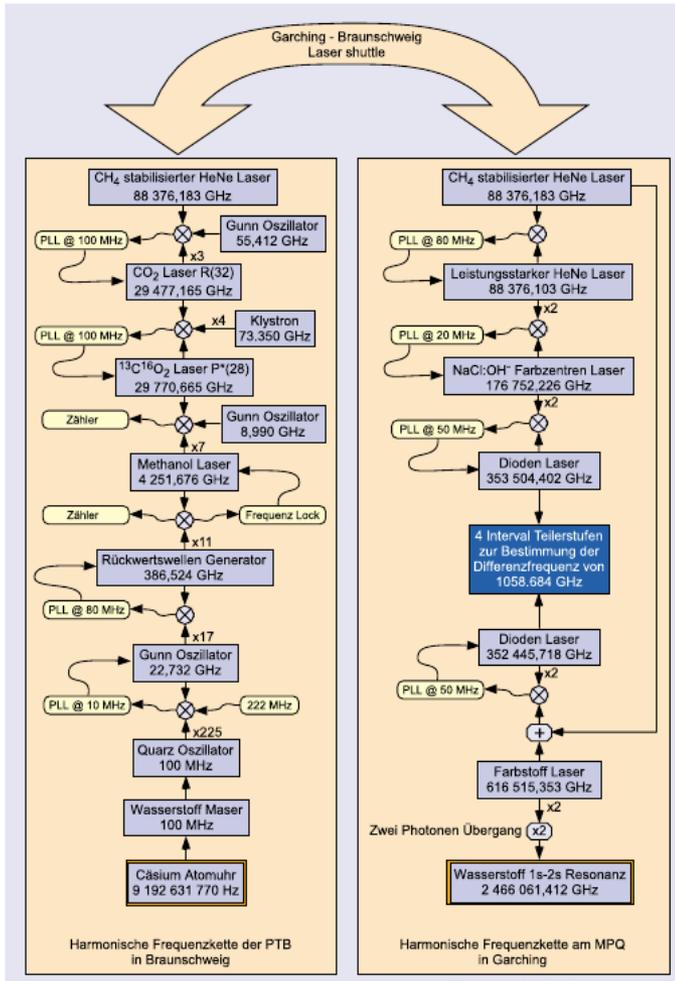


Abb. 2:

Die harmonische Frequenzkette, die 1997 zur Messung der 1s-2s-Übergangsfrequenz in atomarem Wasserstoff eingesetzt wurde, füllte zwei große Labors, eines bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (links) und eines am Max-Planck Institut für Quantenoptik in Garching (rechts) [4, 5]. Das Ausgangssignal bei 9,19263177 GHz einer Cäsium-Atomuhr wird in mehreren Schritten bis zur Wasserstoffresonanz bei 2466,061412 THz multipliziert. Der Aufwand für jeden Schritt entspricht einer Doktorarbeit. Die Frequenzmischer sind mit ⊗ symbolisiert. Als Verbindungsstück diente ein Methan-stabilisierter Helium-Neon-Laser bei 88,376 THz, der zwischen Braunschweig und Garching transportiert wurde. Die Frequenz-lücke von $\Delta f = 1058,684 \text{ GHz} \approx 1 \text{ THz}$ auf der rechten Seite wurde mit vier optischen Intervallteilerstufen, bestehend aus sechs weiteren Lasern, in eine Radiofrequenz konvertiert und gezählt. Die gesamte Frequenzkette kann heute durch den Aufbau in Abb. 1 ersetzt werden.

Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch, Physik Journal Nr. 2 (2002) 39

Nobelpreis 2005: Frequenzkamm



The Nobel Prize in Physics 2005

"for his contribution to the quantum theory of optical coherence"

"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

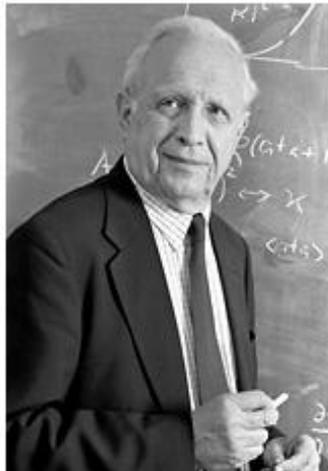


Photo: J.Reed

Roy J. Glauber

🕒 1/2 of the prize



Photo: Sears,P.Studio

John L. Hall

🕒 1/4 of the prize



Photo: F.M. Schmidt

Theodor W. Hänsch

🕒 1/4 of the prize

Metrologie: Frequenzkette

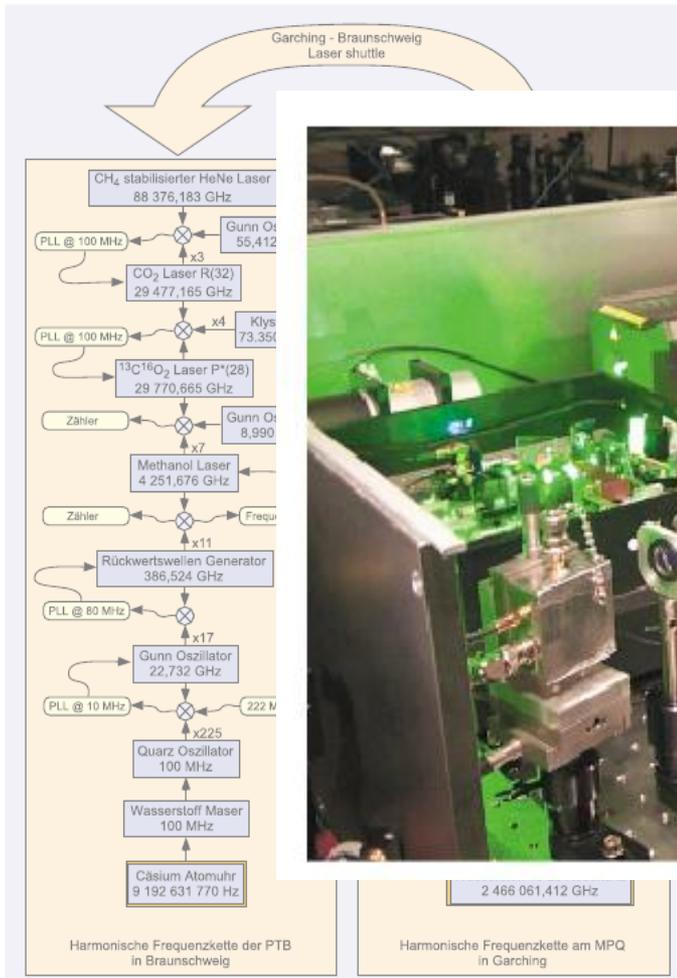
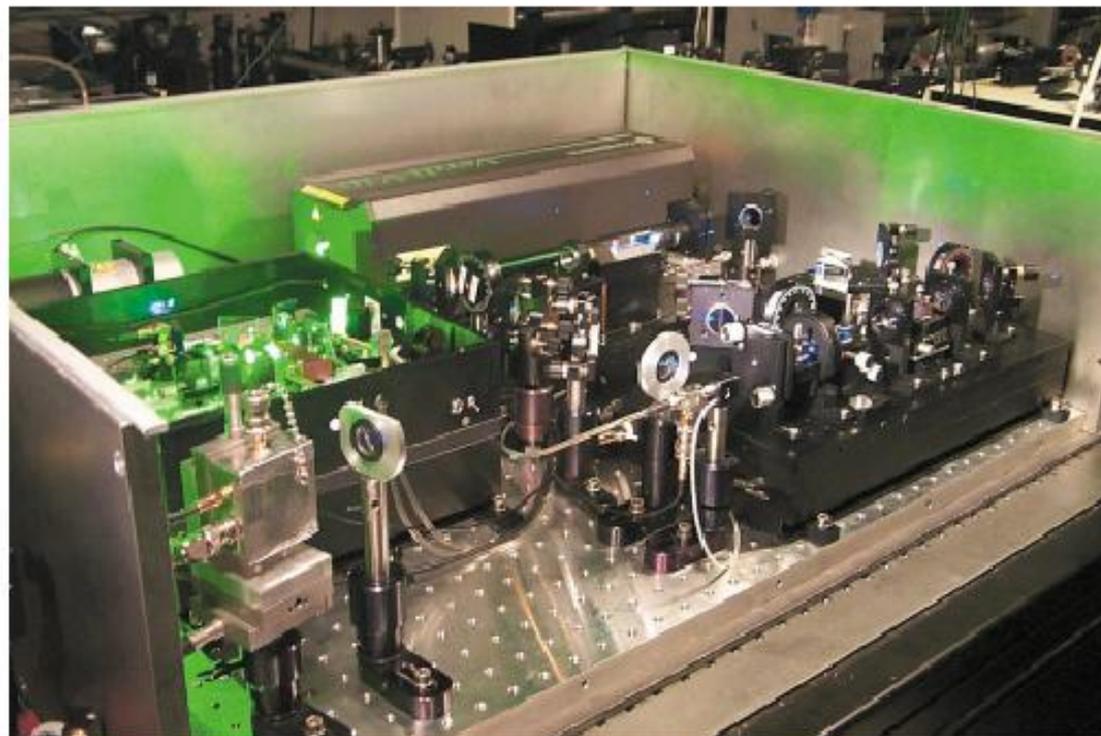


Abb. 2:

Die harmonische Frequenzkette, die 1997 zur Messung der 1s-2s-Übergangsfrequenz in atomarem Wasserstoff eingesetzt wurde, ist hier dargestellt.

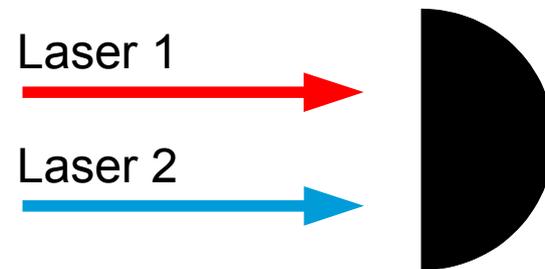
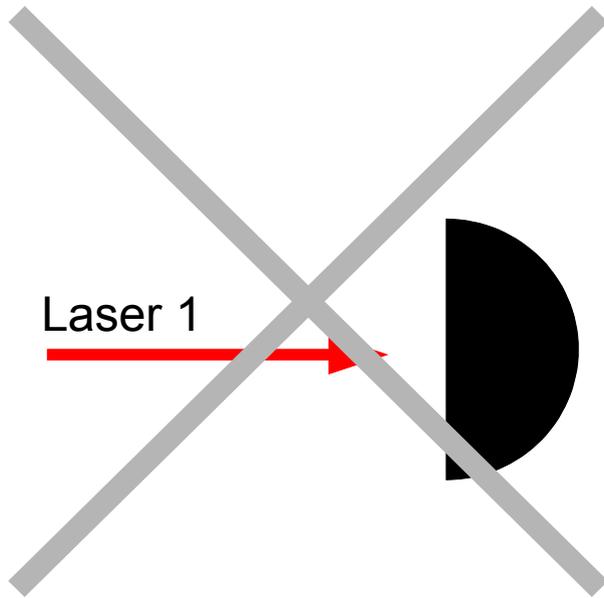


Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und eines am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching (rechts) wurde. Die Frequenzkette besteht aus sechs Frequenzmischern und einem Methanol-Laser. Der Aufwand für jeden Frequenzmischer ist im Vergleich zu einem Laser sehr gering. Die Frequenzkette ist über einen 222-MHz-Kanal mit dem PTB verbunden.

Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch, Physik Journal Nr. 2 (2002) 39

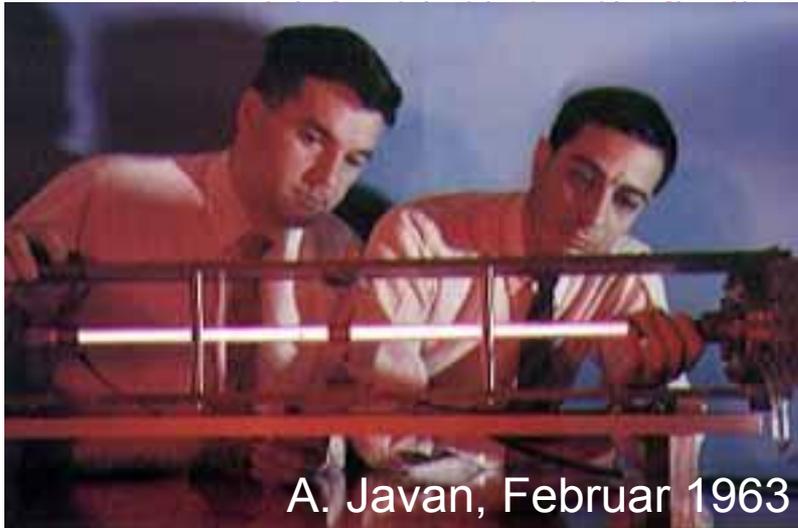
Warum nicht die Frequenz direkt messen?

- **Derzeitiger Zeitstandard**
 - Frequenz: ca. 9 GHz = 9 000 000 000 Hz
- **Optische Frequenzen**
 - Übergang: ca. 750 – 1000 THz = 1 000 000 000 000 000 Hz

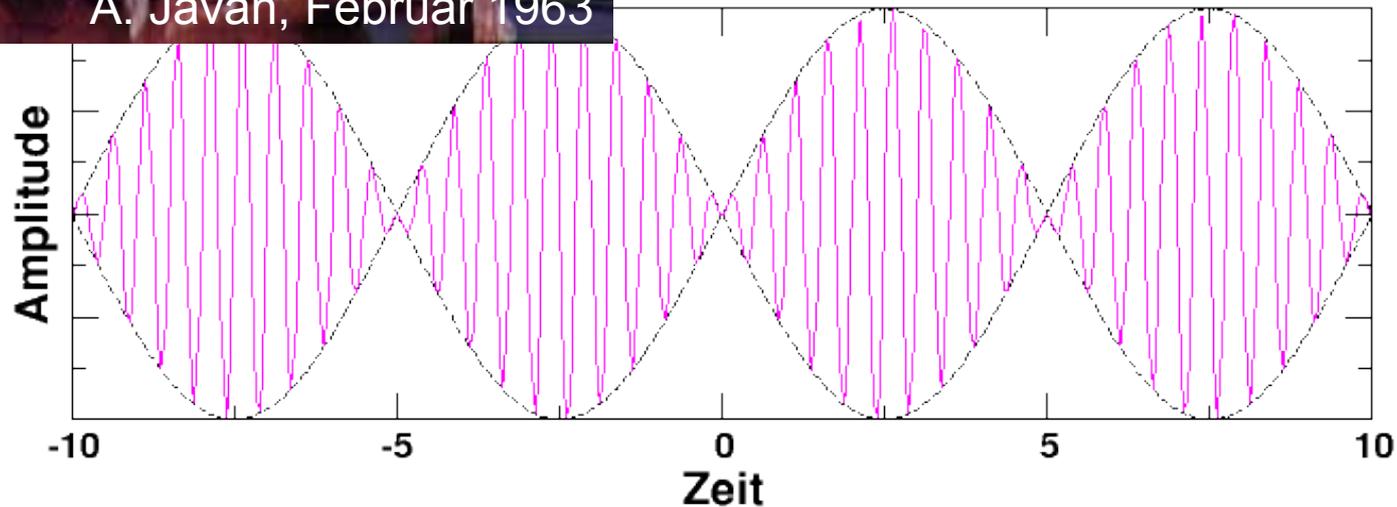
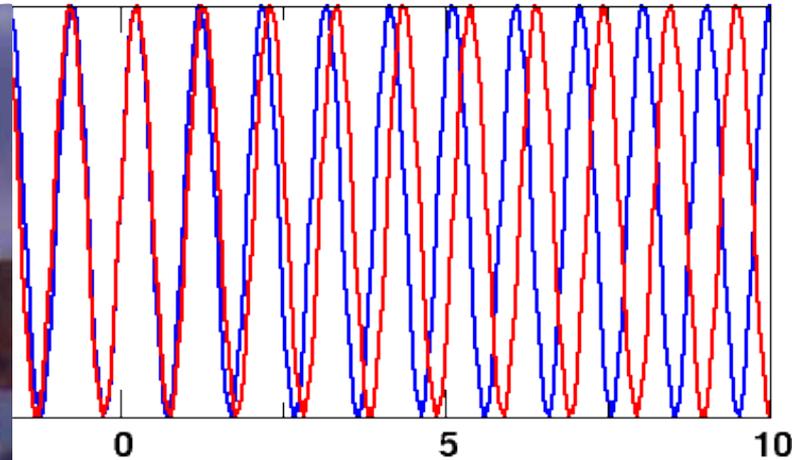


Heterodyn-Verfahren

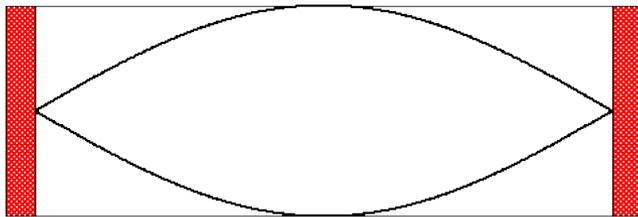
Heterodyn-Messung: Schwebungsfrequenz



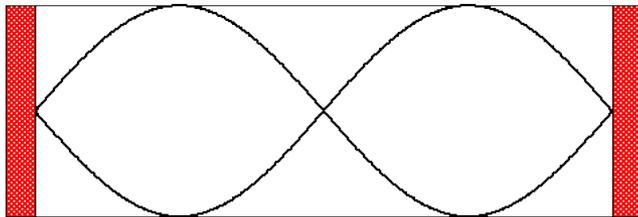
A. Javan, Februar 1963



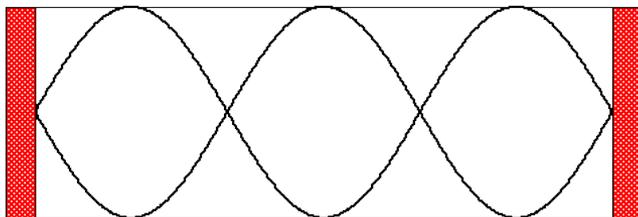
Strahlung eines Lasers



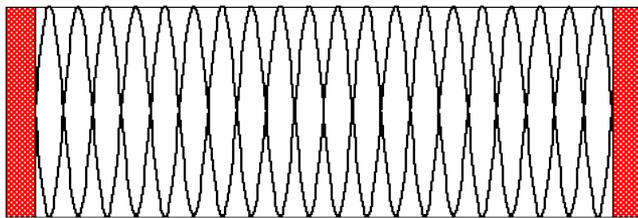
$n=1$



$n=2$



$n=3$



$n=20$

$-L/2$

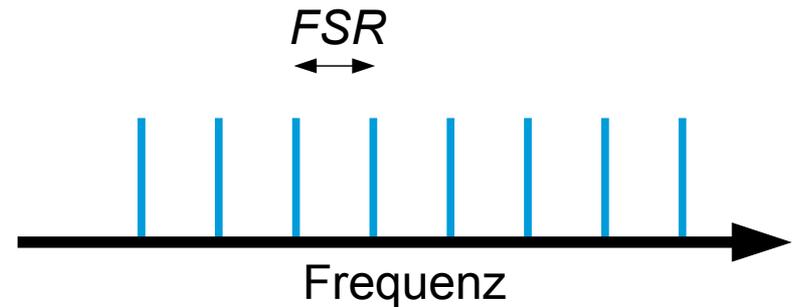
$L/2$

Longitudinalmoden:

$$n \frac{\lambda}{2} = L$$

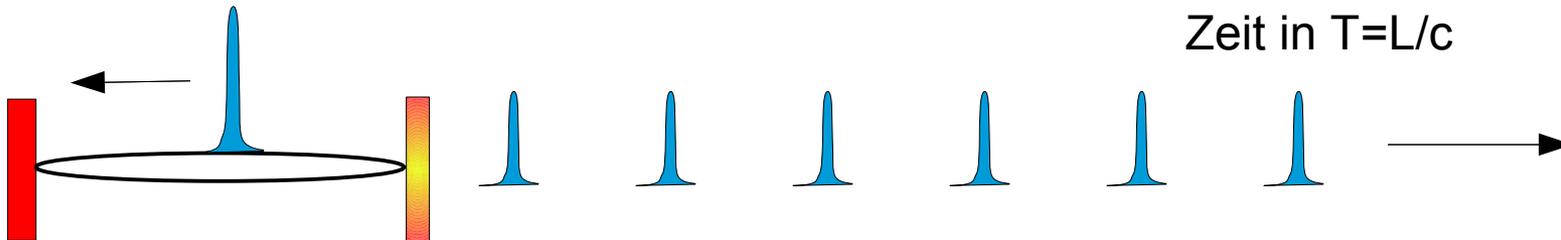
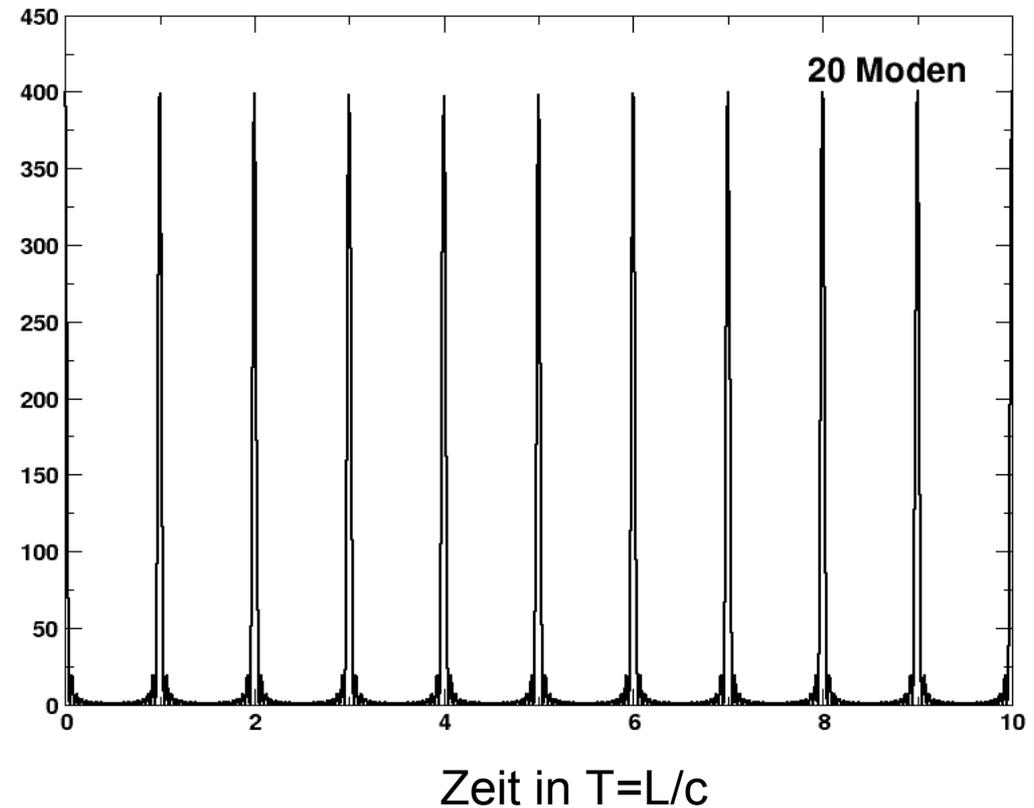
Frequenzabstand aufeinander folgender Moden:

$$FSR = \frac{c}{2L}$$

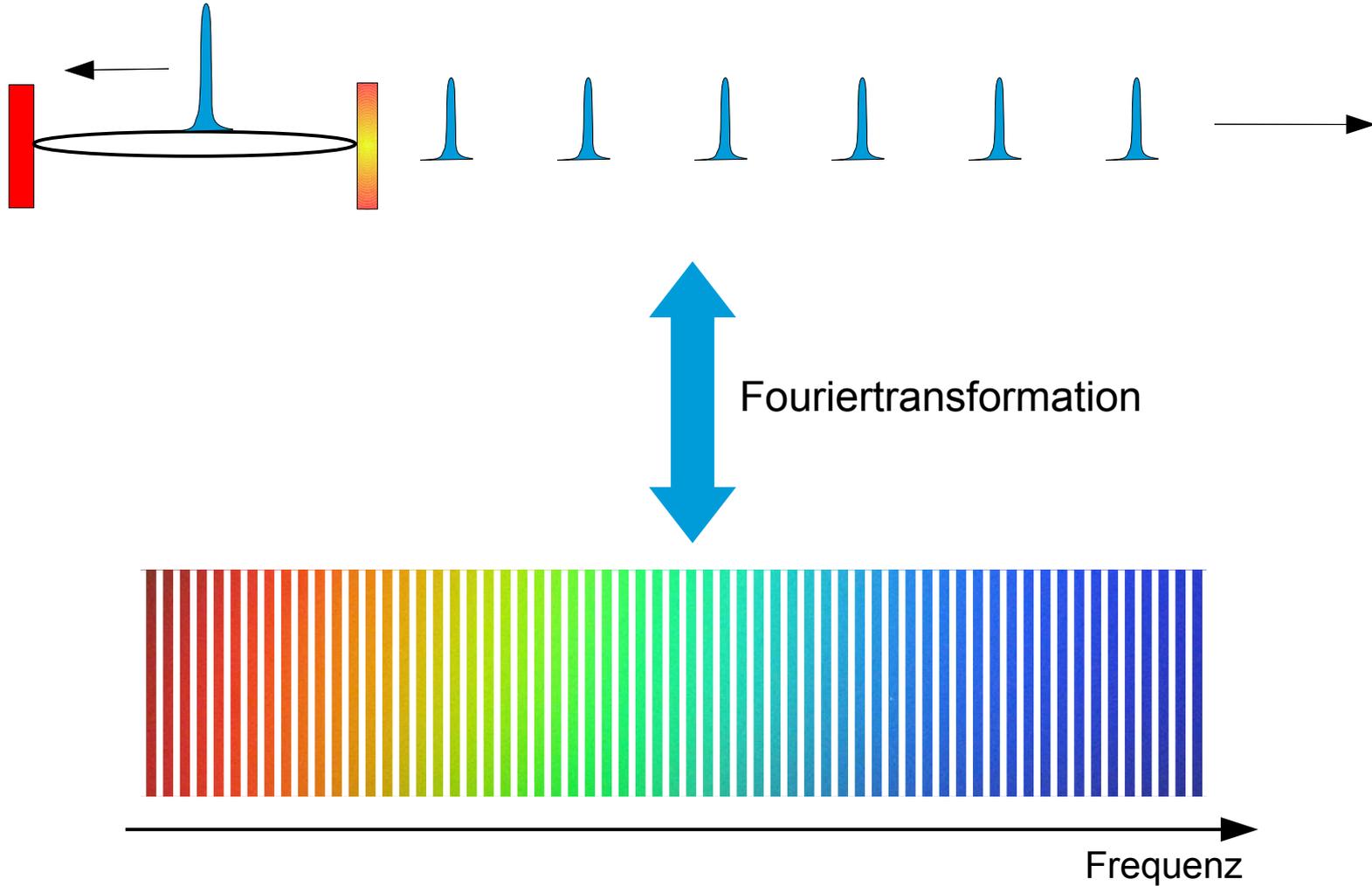


Modenkopplung

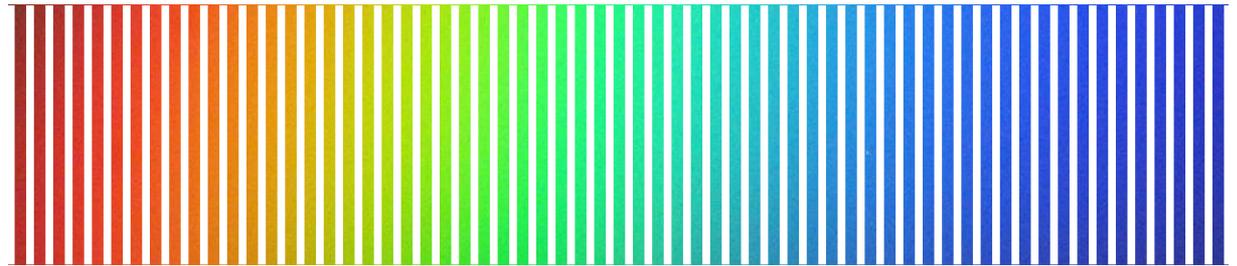
- **Modenkopplung: kurze Pulse in regelmäßigen Abständen**
- **Laserpuls läuft im Resonator um**
- **Spektrum besteht aus „Frequenzkamm“ (den Moden des Resonators)**



Fouriertransformation



Messung einer optischen Frequenz $f_?$



- **Frequenzkamm:** $f_m = m \times f_{rep} + f_{offset}$

- **Messung:**

- f_{rep}

- Schwebung zwischen f_m und $f_?$

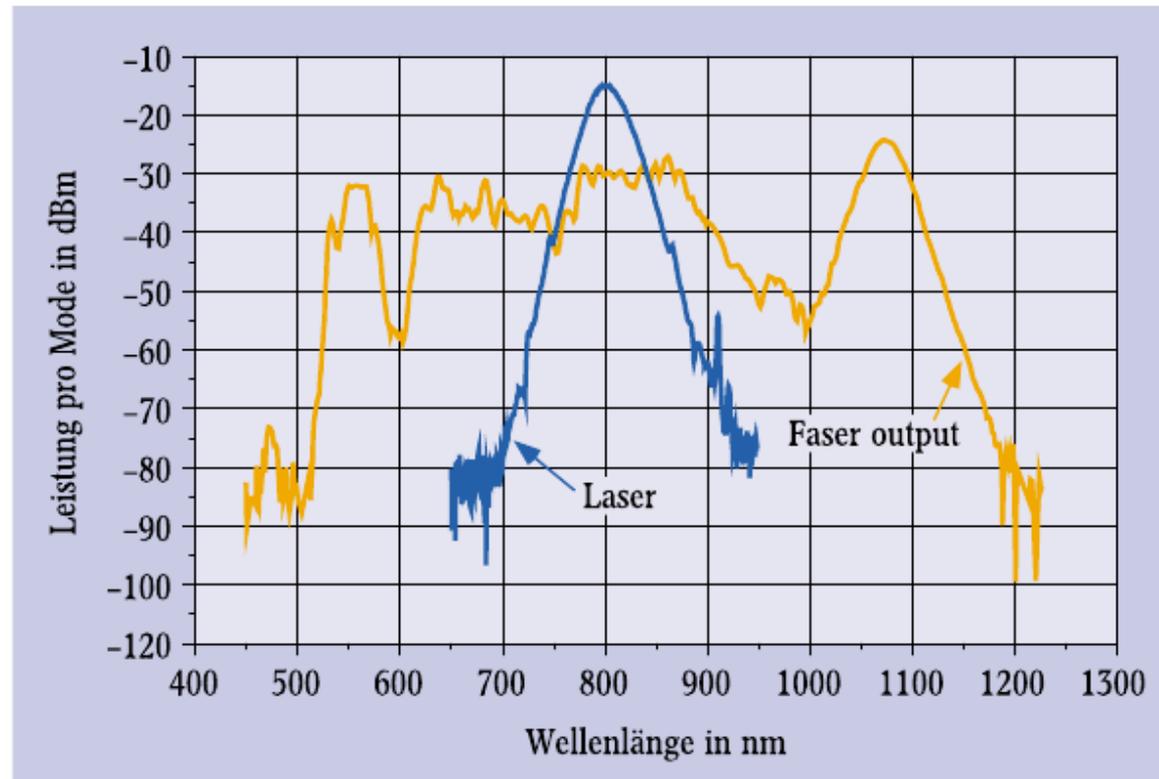
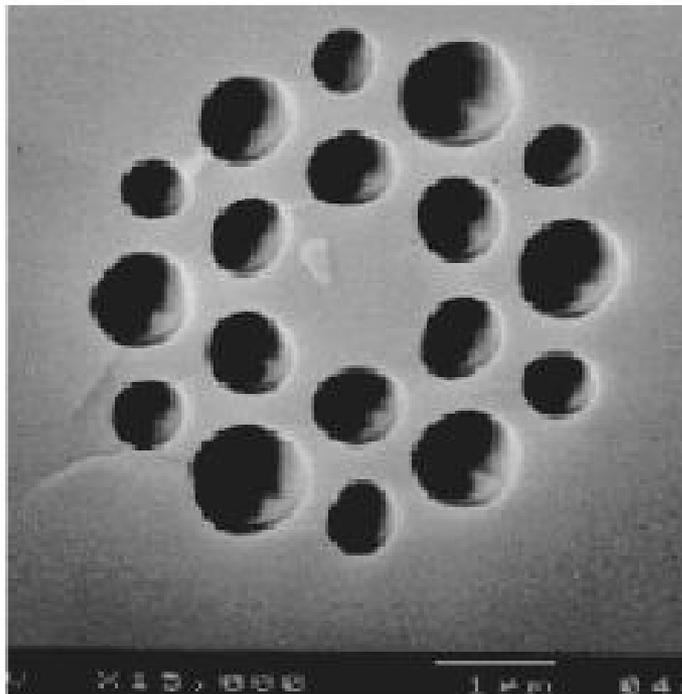
$$f_m = m \times f_{rep} + f_{offset}$$

- **Messung von m durch „herkömmliche“ Methoden**

- **Messung von f_{offset} ?**

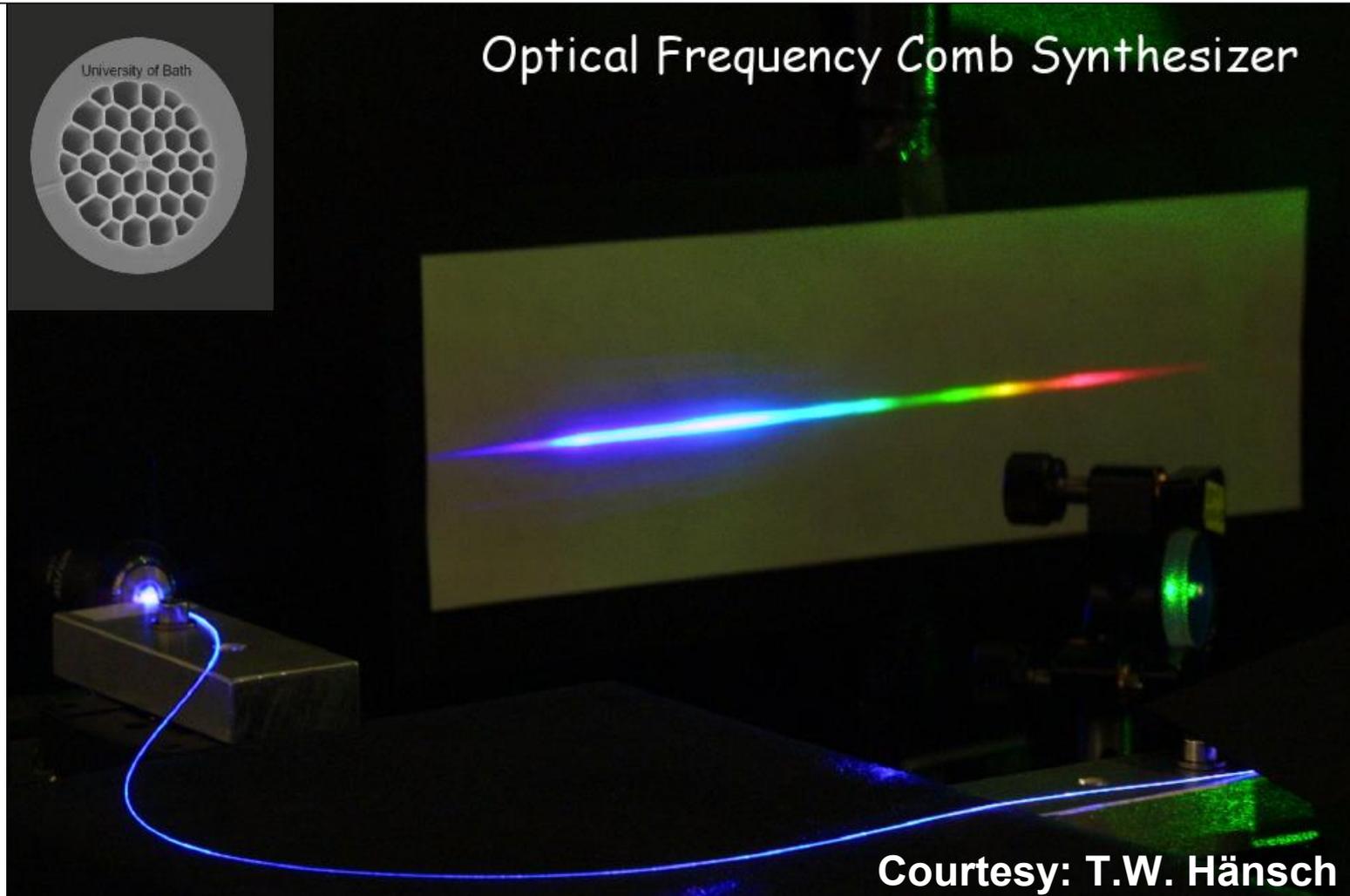
Kerr-Effekt: Verbreiterung des Kamms

$$n(\omega, I) = n_0(\omega) + n_2(\omega)I$$

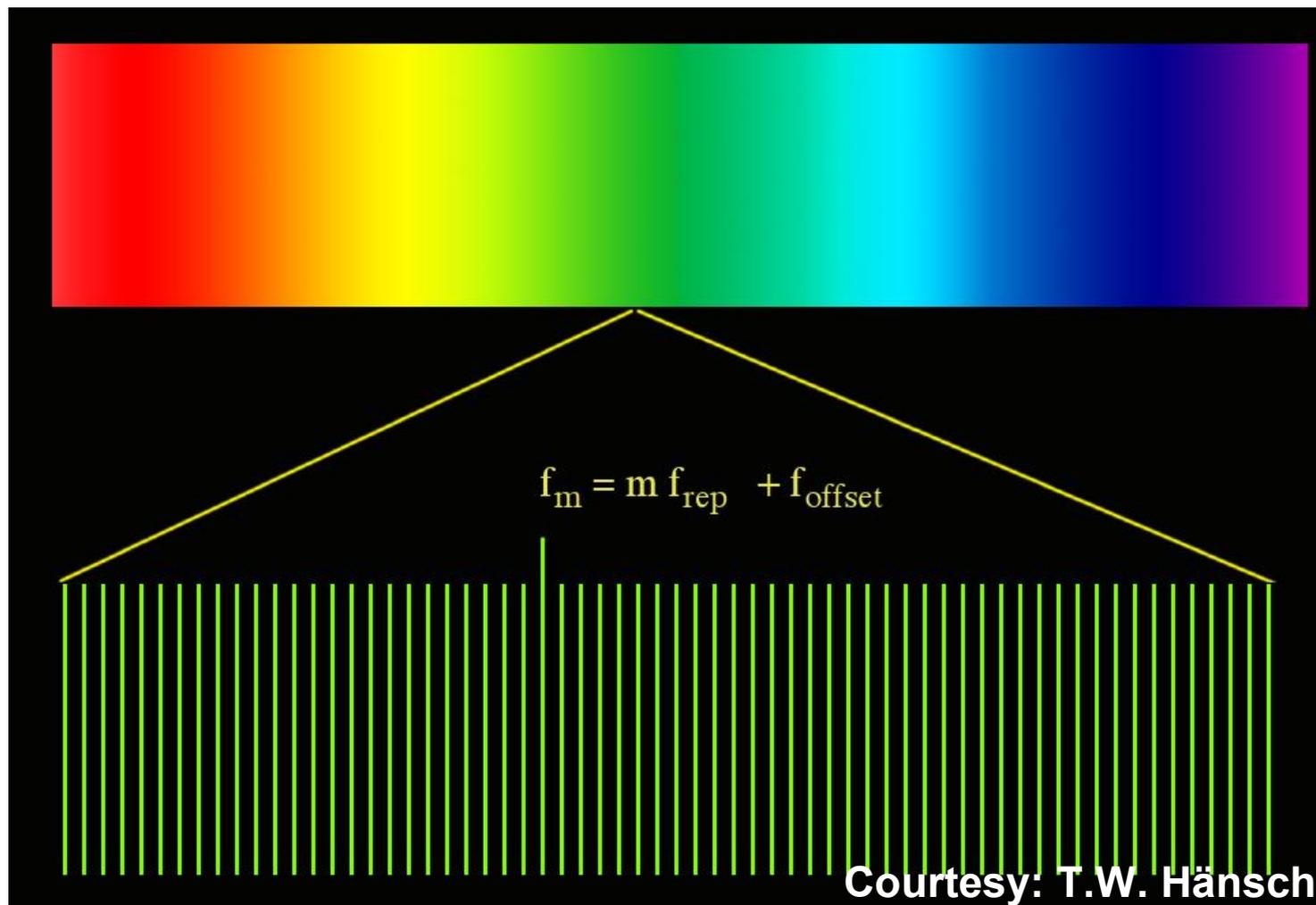


Th. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hänsch, Physik Journal Nr. 2 (2002) 39

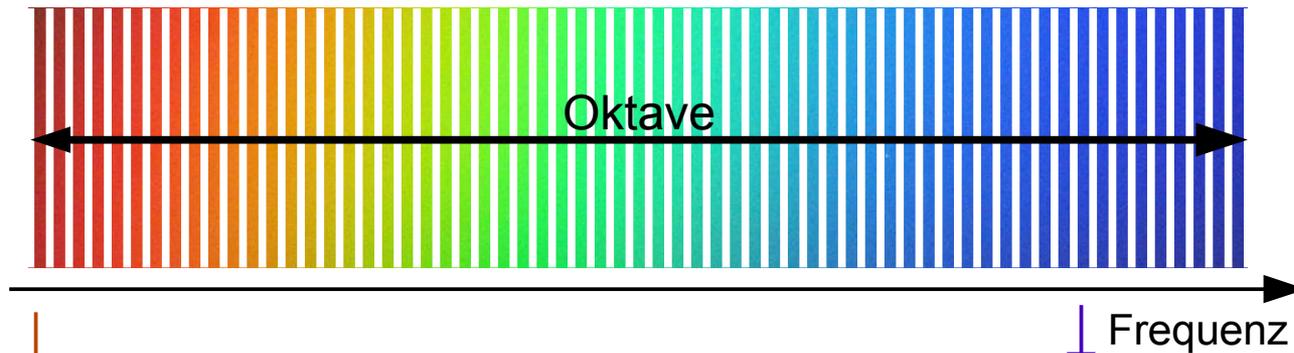
Output eines Frequenzkamms



Spektrum



Metrologie: Frequenzkamm über eine Oktave



$$f_m = m \times f_{rep} + f_{offset}$$

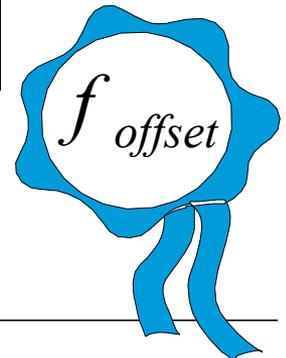
$$f_{2m} = 2m \times f_{rep} + f_{offset}$$

$$2\omega$$

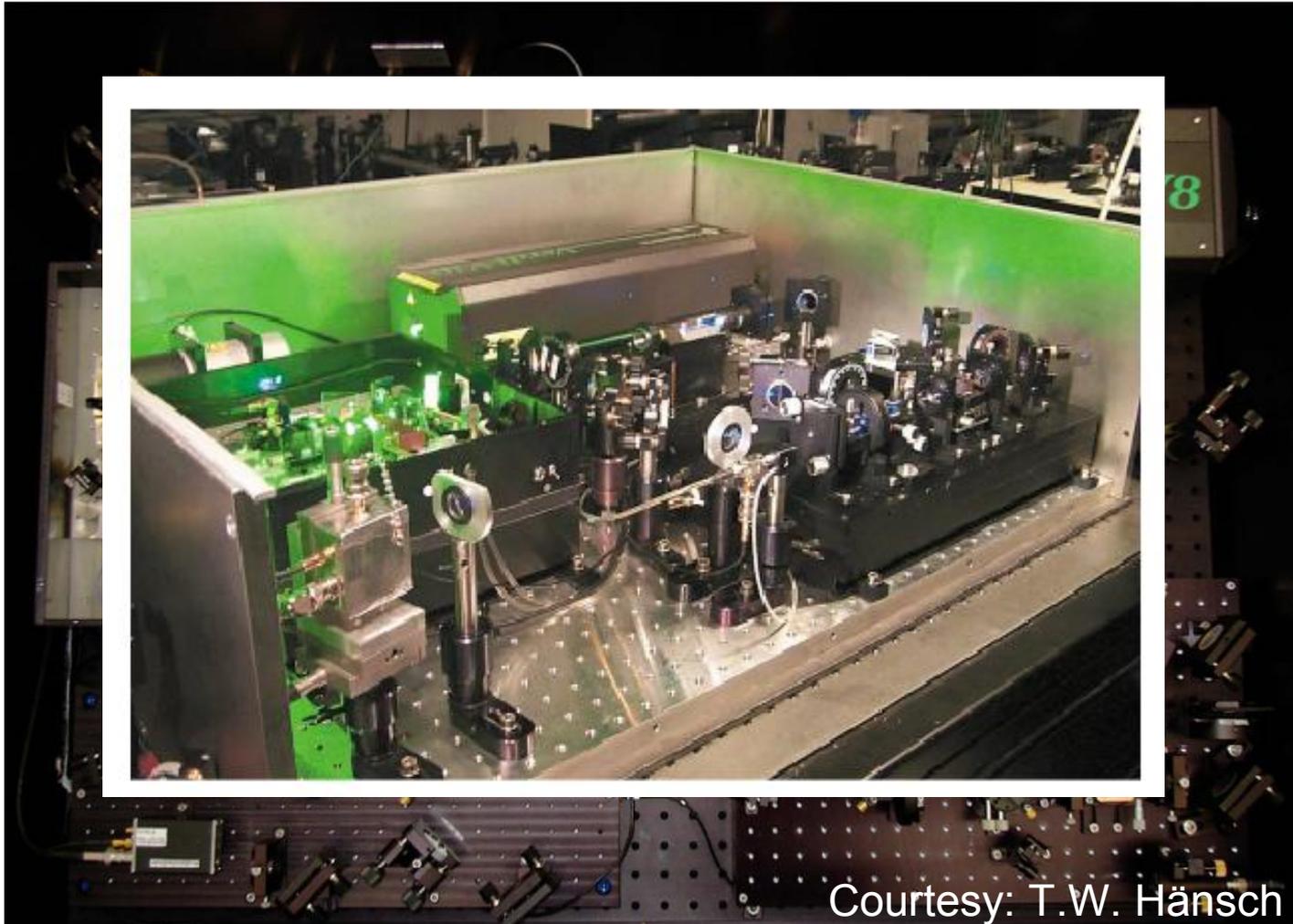
Schwebung

$$2f_m = 2m \times f_{rep} + 2f_{offset}$$

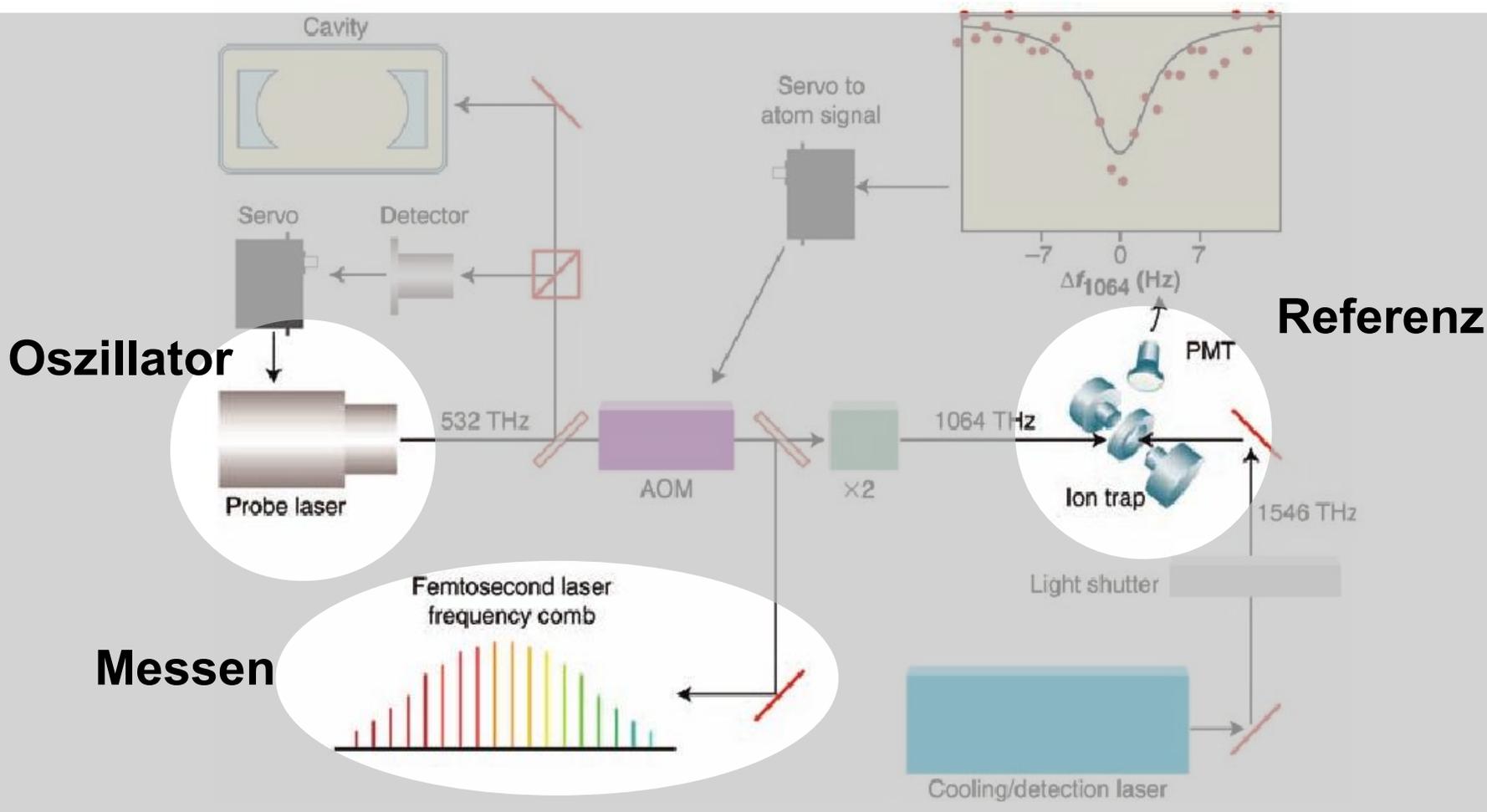
$$2f_m - f_{2m}$$



Frequenzkamm

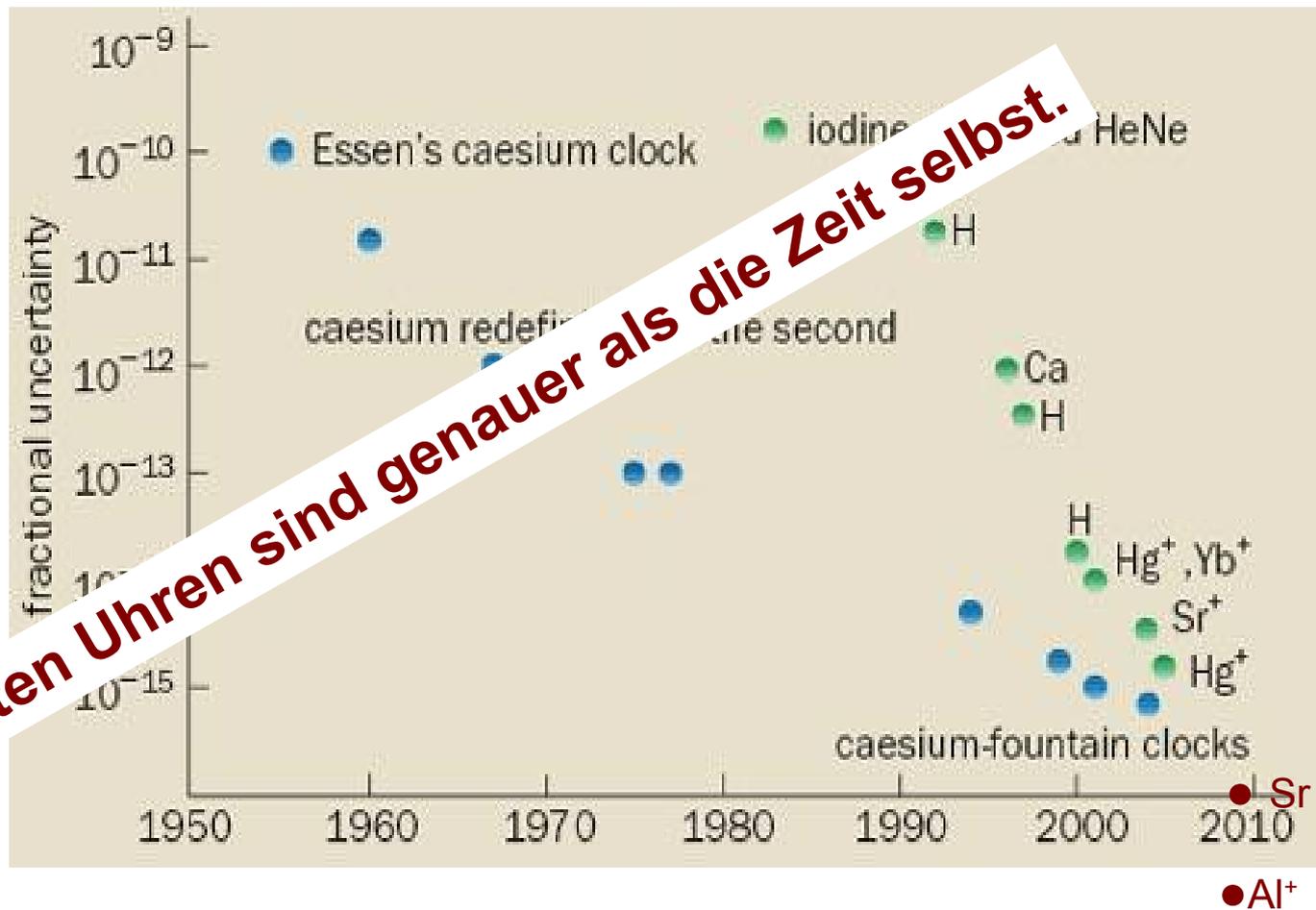
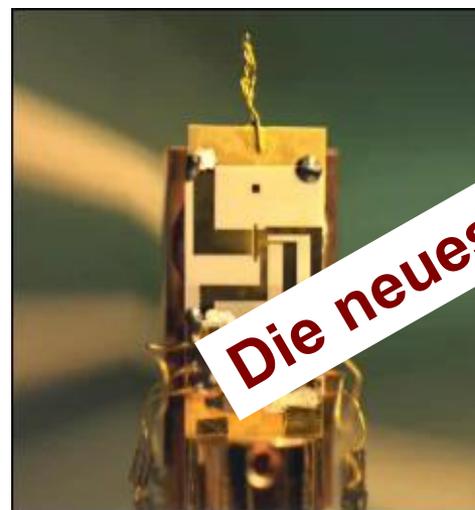
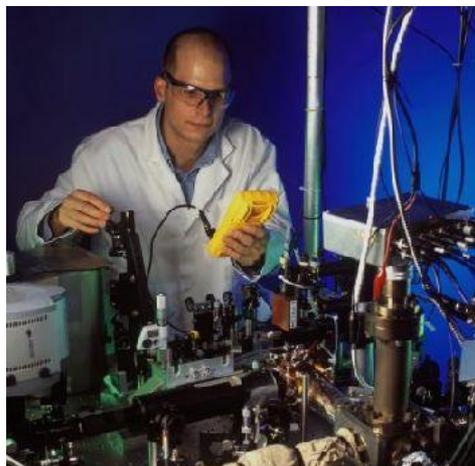


Die komplette „Uhr“



S. A. Diddams,* J. C. Bergquist, S. R. Jefferts, C. W. Oates, Science **306** (2004) 1318

Status der optischen Uhren



- **Optische Uhren seit März 2008 genauer als Cs Zeitstandard**
- **Bedeutung der Genauigkeit**
 - 10^{-14} 1 Sekunde in 3 Millionen Jahren
 - 10^{-15} 1 Sekunde in 31 Millionen Jahren
 - 10^{-16} 1 Sekunde in 317 Millionen Jahren
 - 10^{-17} 1 Sekunde in 3 Milliarden Jahren
 - 10^{-18} 1 Sekunde in 31 Milliarden Jahren
- **Herausforderungen:**
 - Vergleich der Uhren
 - Synchronisation über weite Distanzen
 - Gravitationseinflüsse



Al⁺-“Uhr“, NIST

Zusammenfassung

- **Universalgerät in Forschung, Entwicklung und Alltag**
 - Grundlagenforschung braucht Zeit
 - Messgerät
 - Produktion
- **LIDAR**
 - Fernerkundung in der Umweltsensorik
 - Atmosphäre
 - Ozean
- **Laser als Uhr**
 - Unglaubliche Präzision
 - Ort der Uhr muss bekannt sein
- **2010 – 50 Jahre Laser**



<http://www.laserfest.org>

