

Beugung und Interferenz

- vom Doppelspalt zum Frequenzkamm

Theodor Hänsch

Carl-Friedrich von Siemens Professor, LMU,
Direktor Emeritus, Max-Planck-Institut für Quantenoptik



Fast alles, was wir über die Welt wissen,
erfahren wir durch das Licht

Was ist Licht?

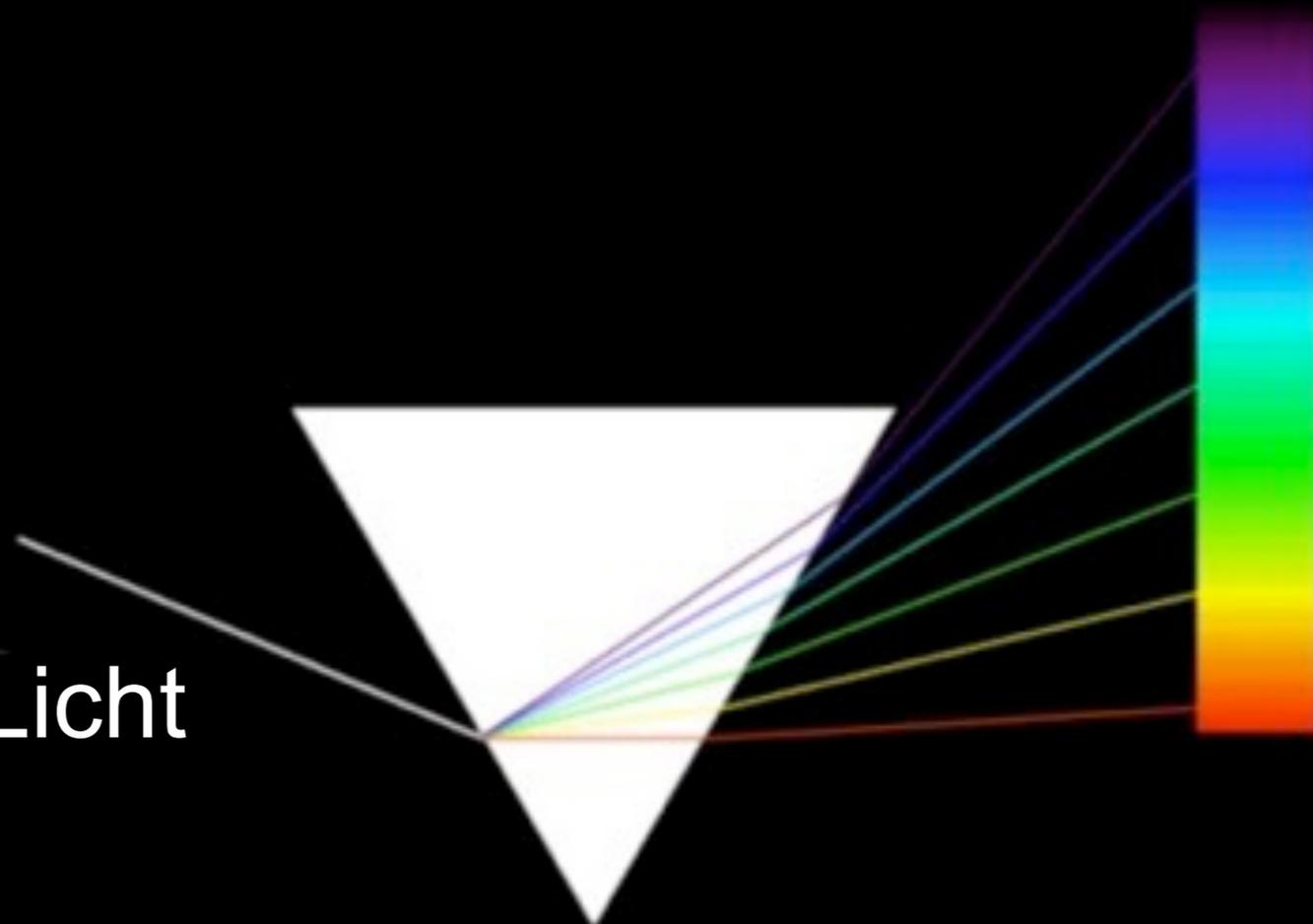
Licht als Teilchen?



Sir Isaac Newton

1642 - 1727

weisses Licht



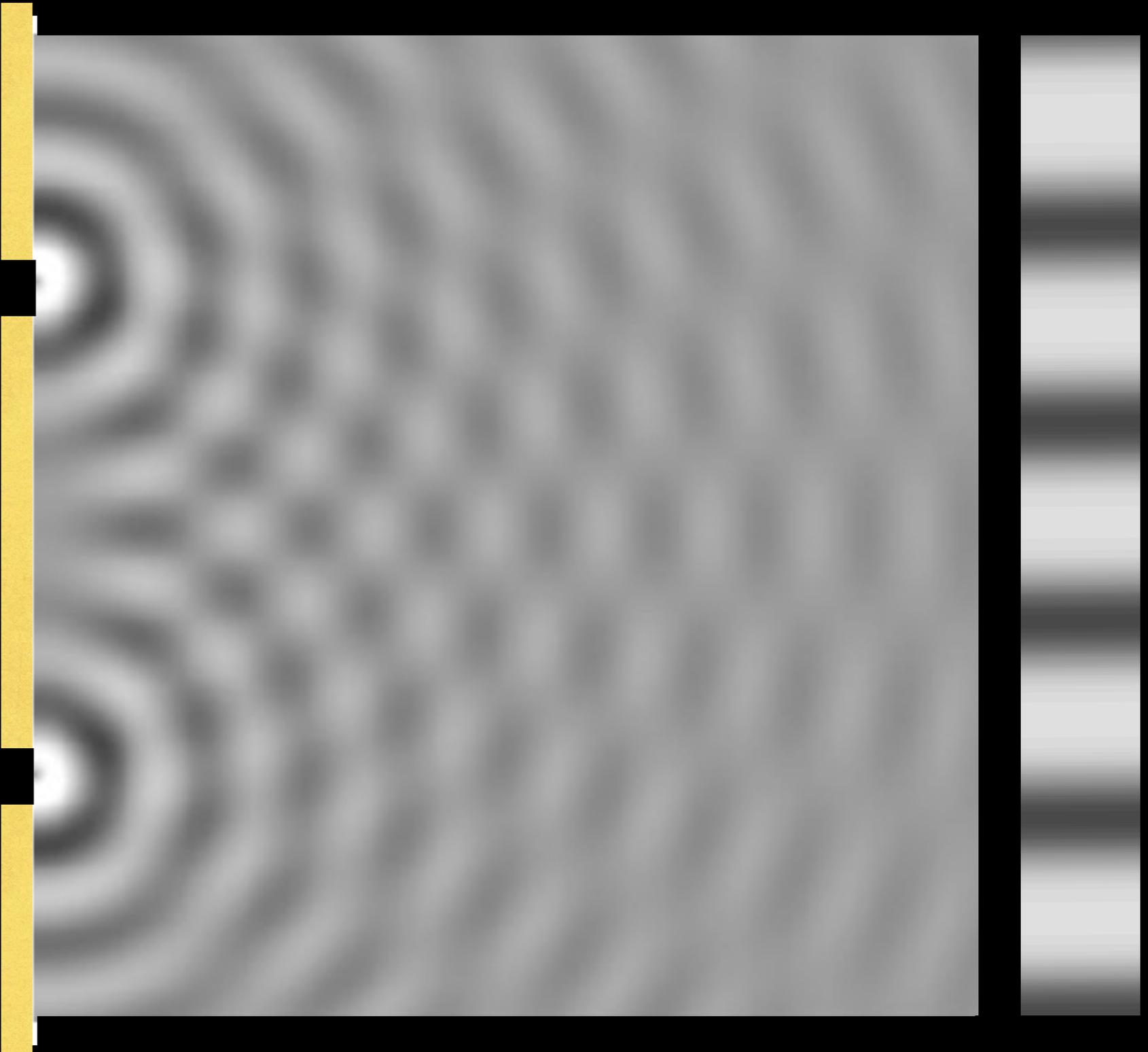
Licht als Welle



Thomas Young
1773 - 1829



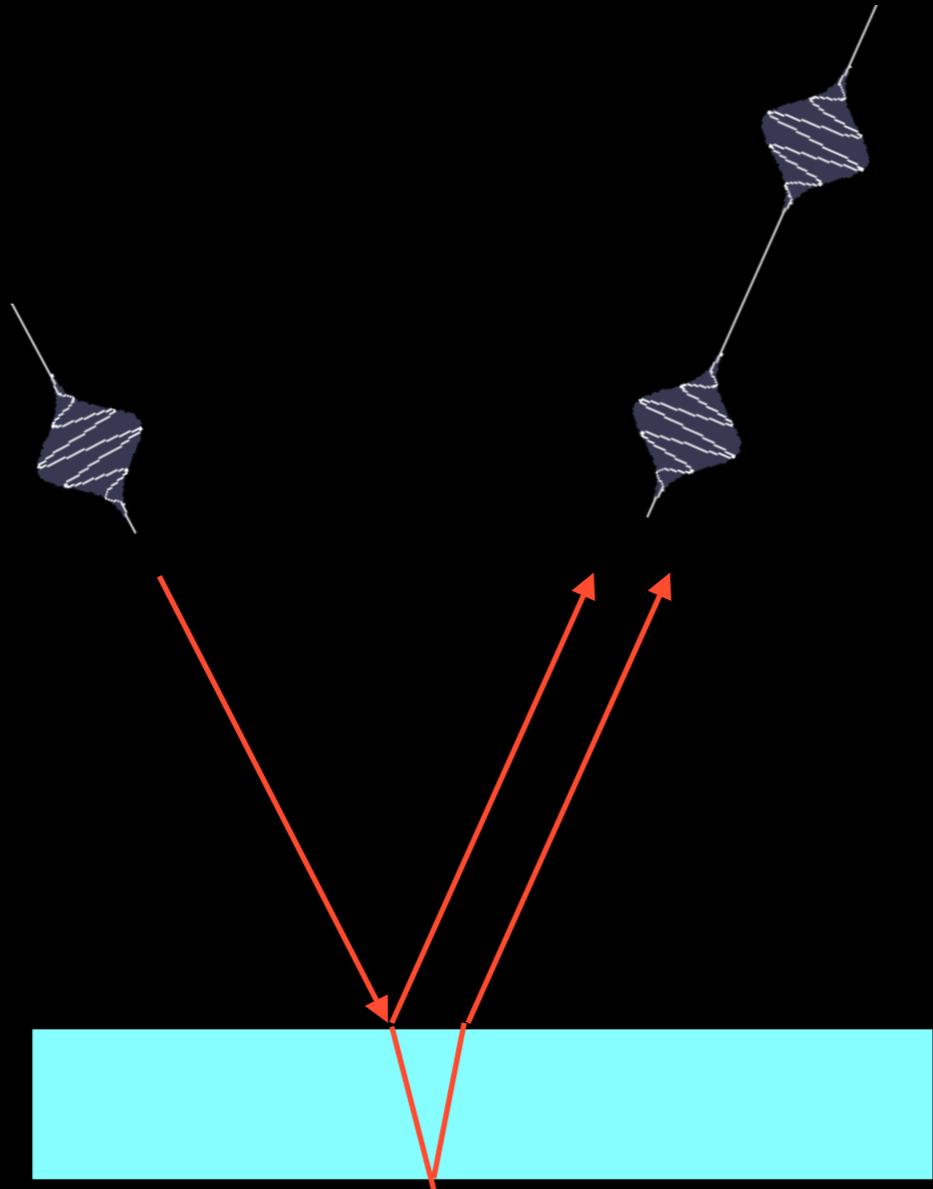
Augustin-Jean
Fresnel
1788 - 1827



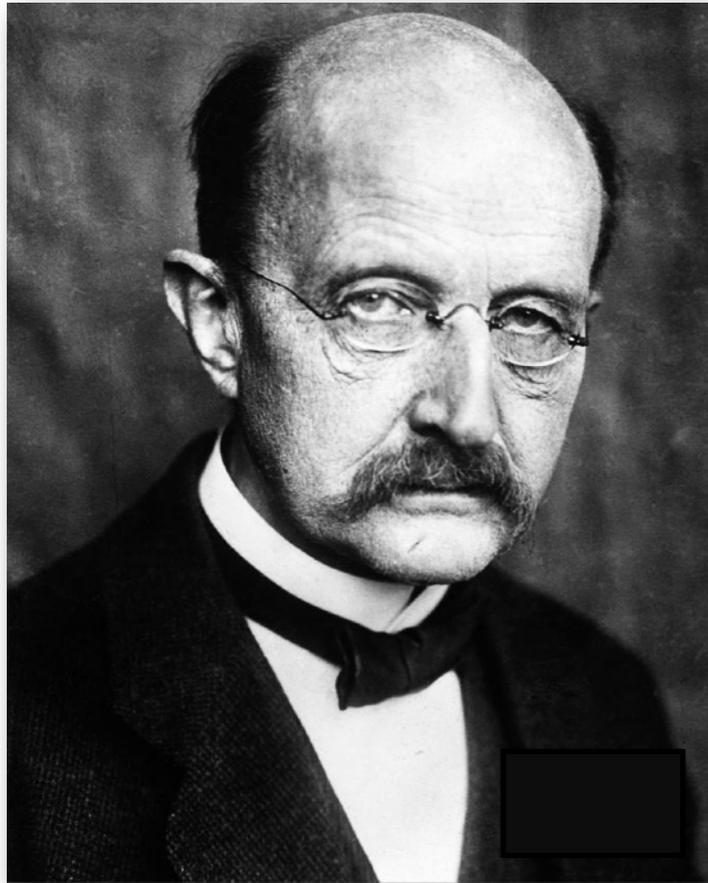


Wellenlänge ←

Interferenzfarben

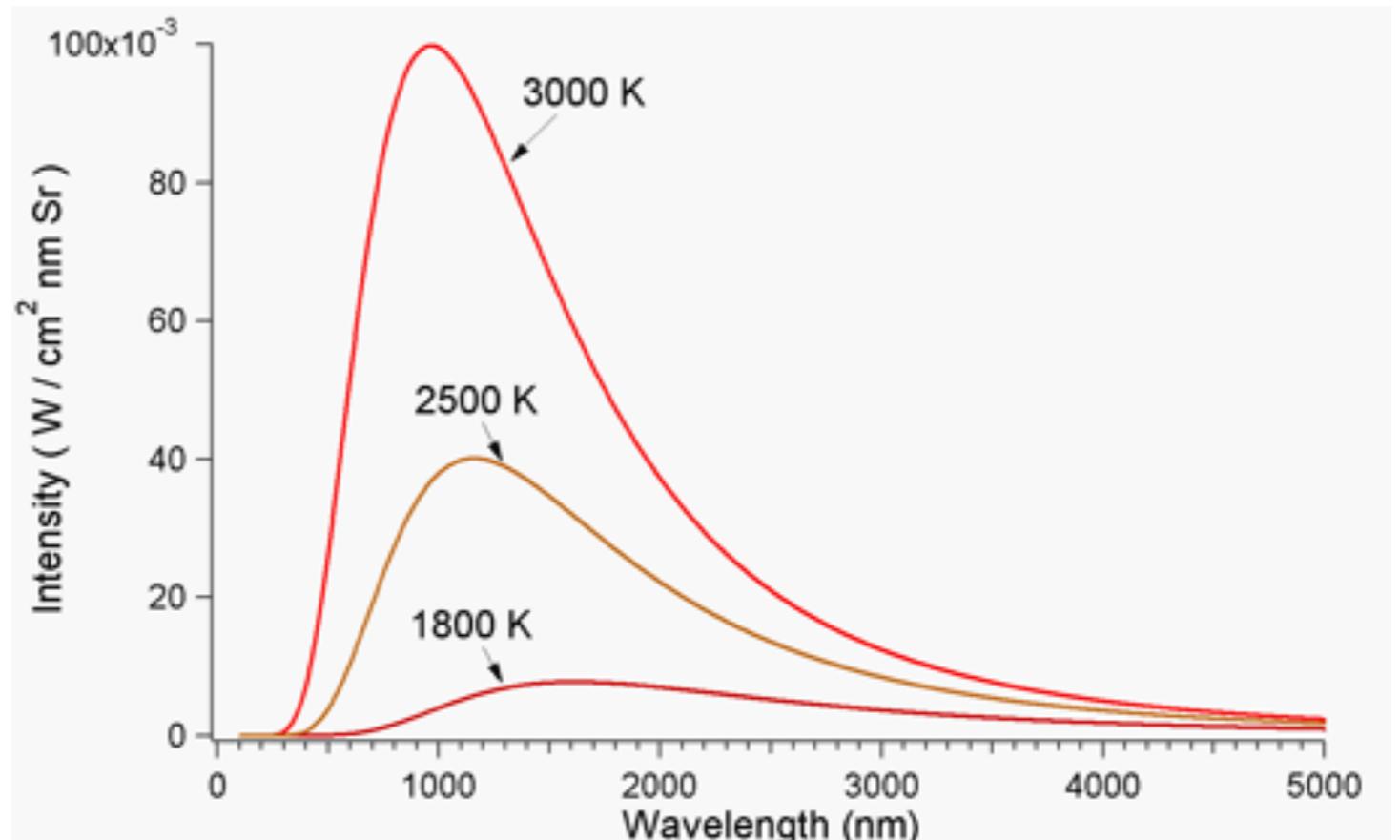


Spektrum der Schwarzkörperstrahlung



Max Planck

1858 - 1947

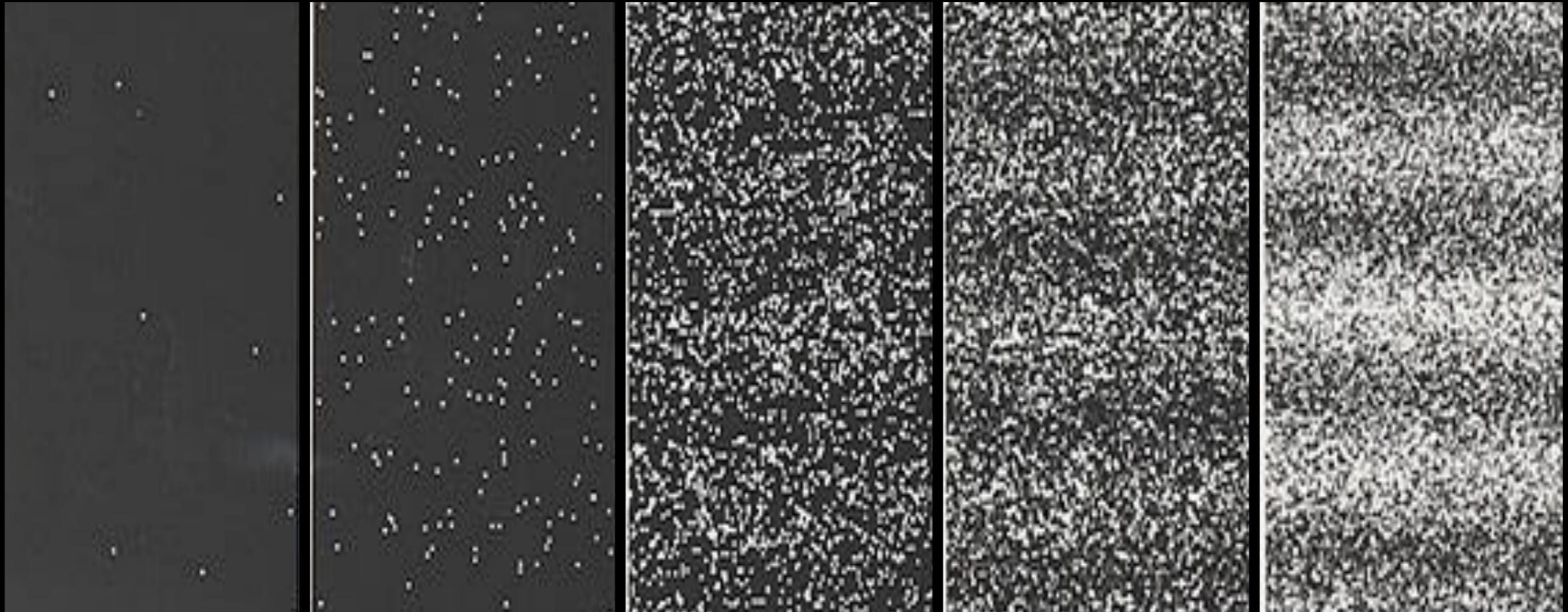


Lichtenergie besteht aus Quanten

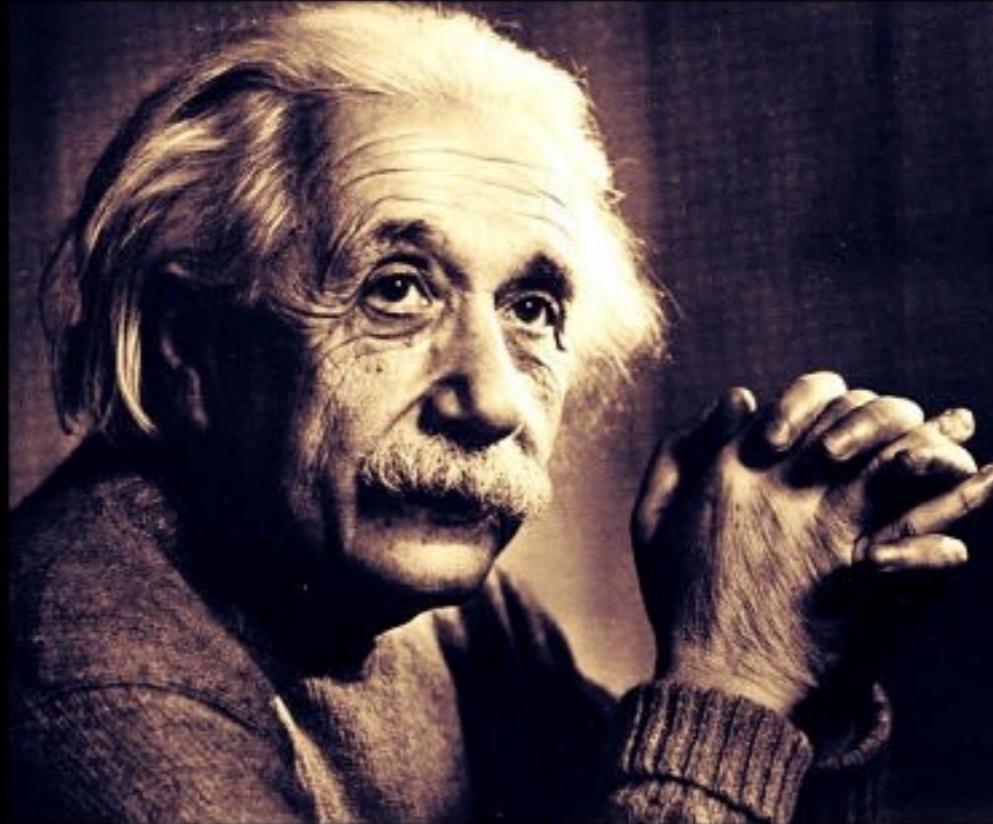
$$E = h\nu$$

(Berlin, 1900)

Photonen



Licht kann sich verhalten als bestünde es aus Teilchen



50 Jahre intensiven Nachdenkens
haben mich der Antwort auf die Frage
‘Was sind Lichtquanten?’
nicht nähergebracht.

Albert Einstein

Beugung und Interferenz von Licht

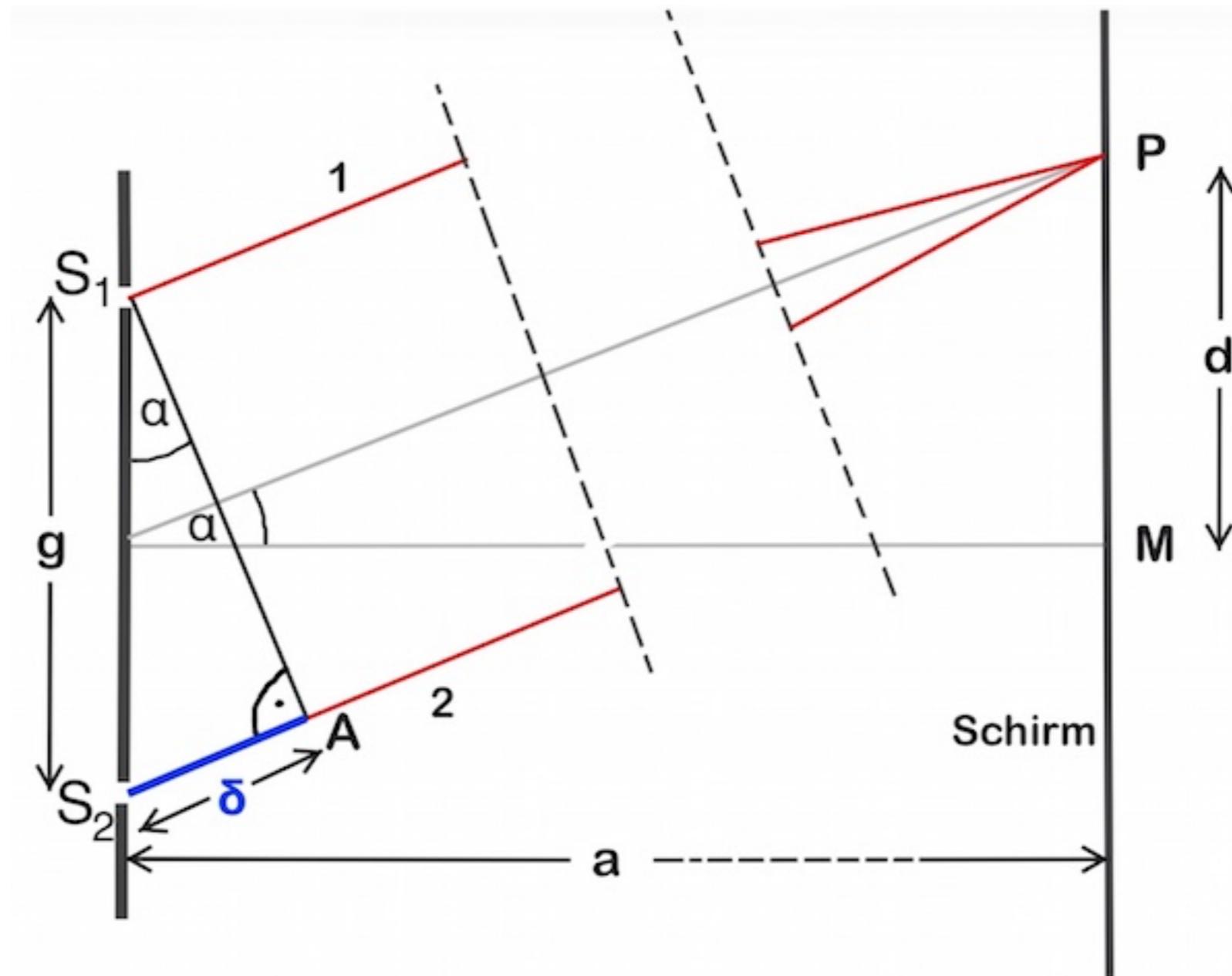
mit (Video-) Experimenten

Geometrische Schatten



Warum sieht man keine Interferenzmuster?

Beugung am Doppelspalt



Konstruktive Interferenz für $\delta = n * \lambda$

Beugungswinkel $\alpha \approx \delta/g$, sehr klein wenn $\lambda \ll g$

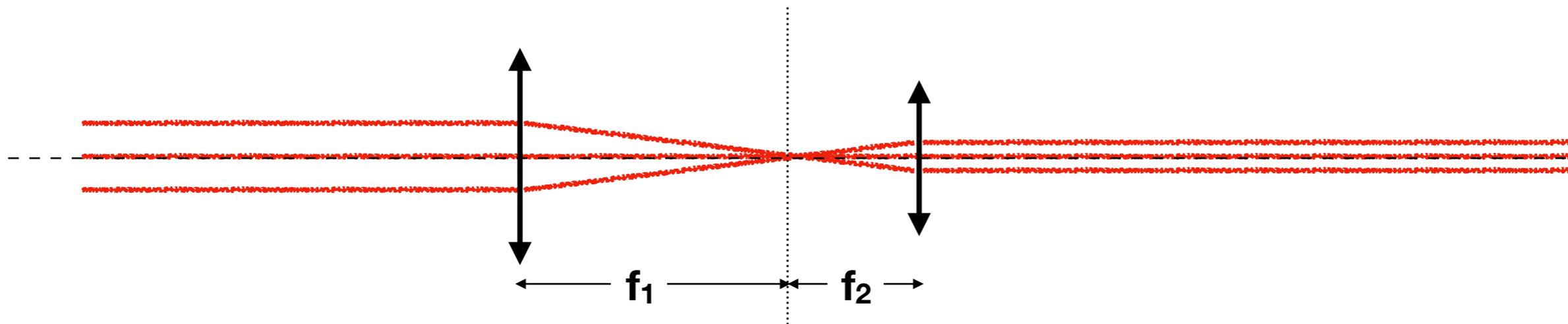
Lichtbeugung und Interferenz mit Alltagsobjekten?

Wie kann man die Beugungswinkel vergrößern?

Fernrohr

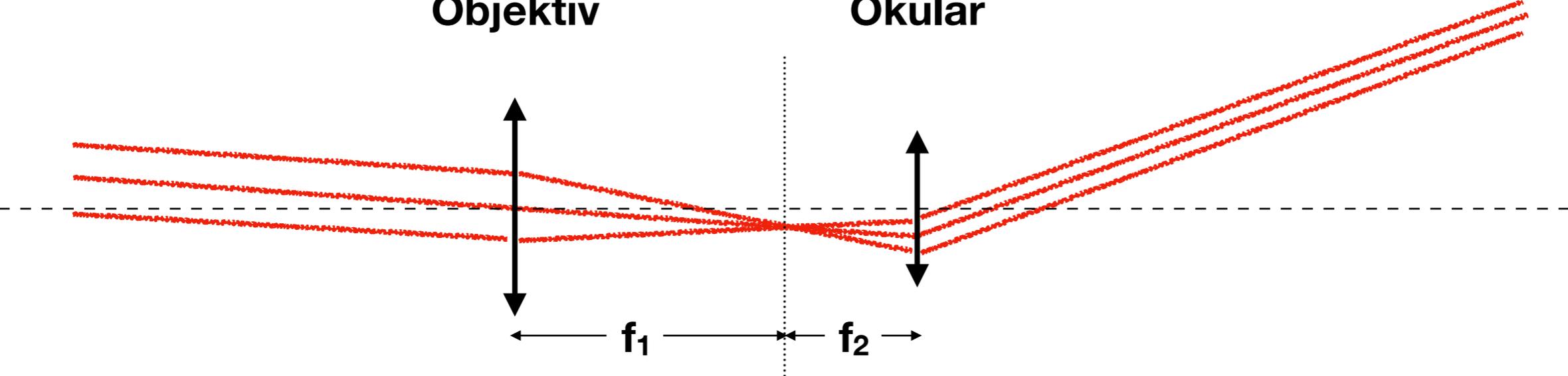
Objektiv

Okular



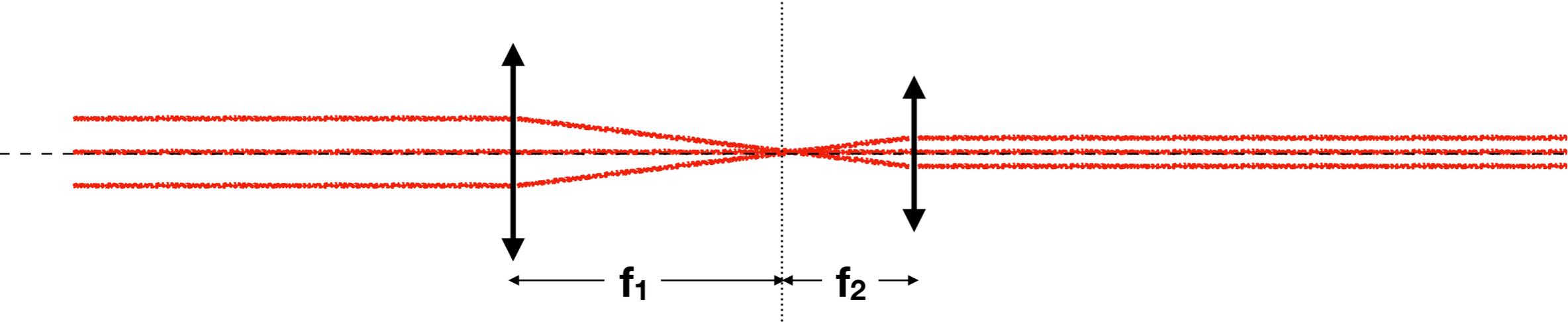
Objektiv

Okular

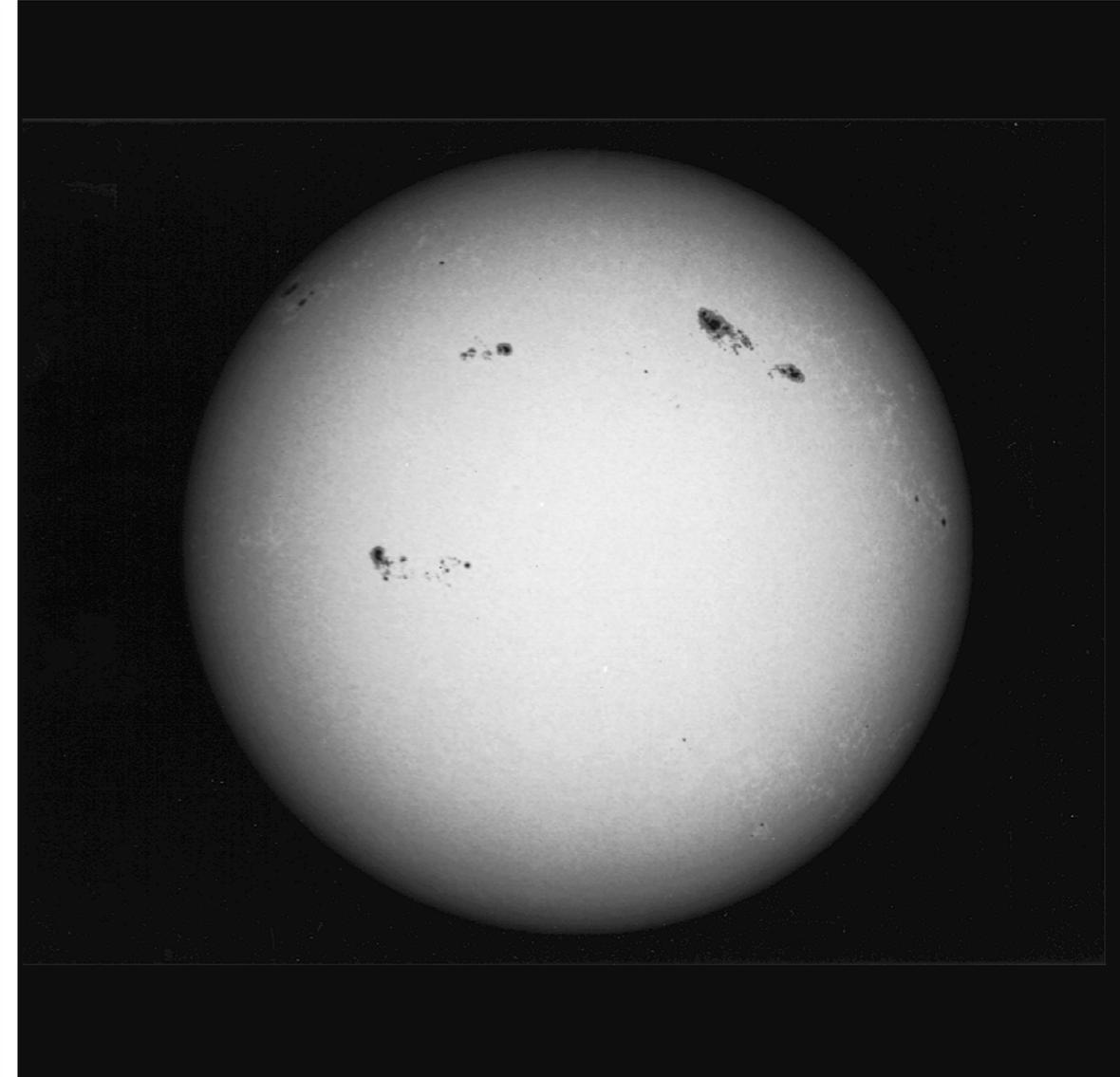


Objektiv

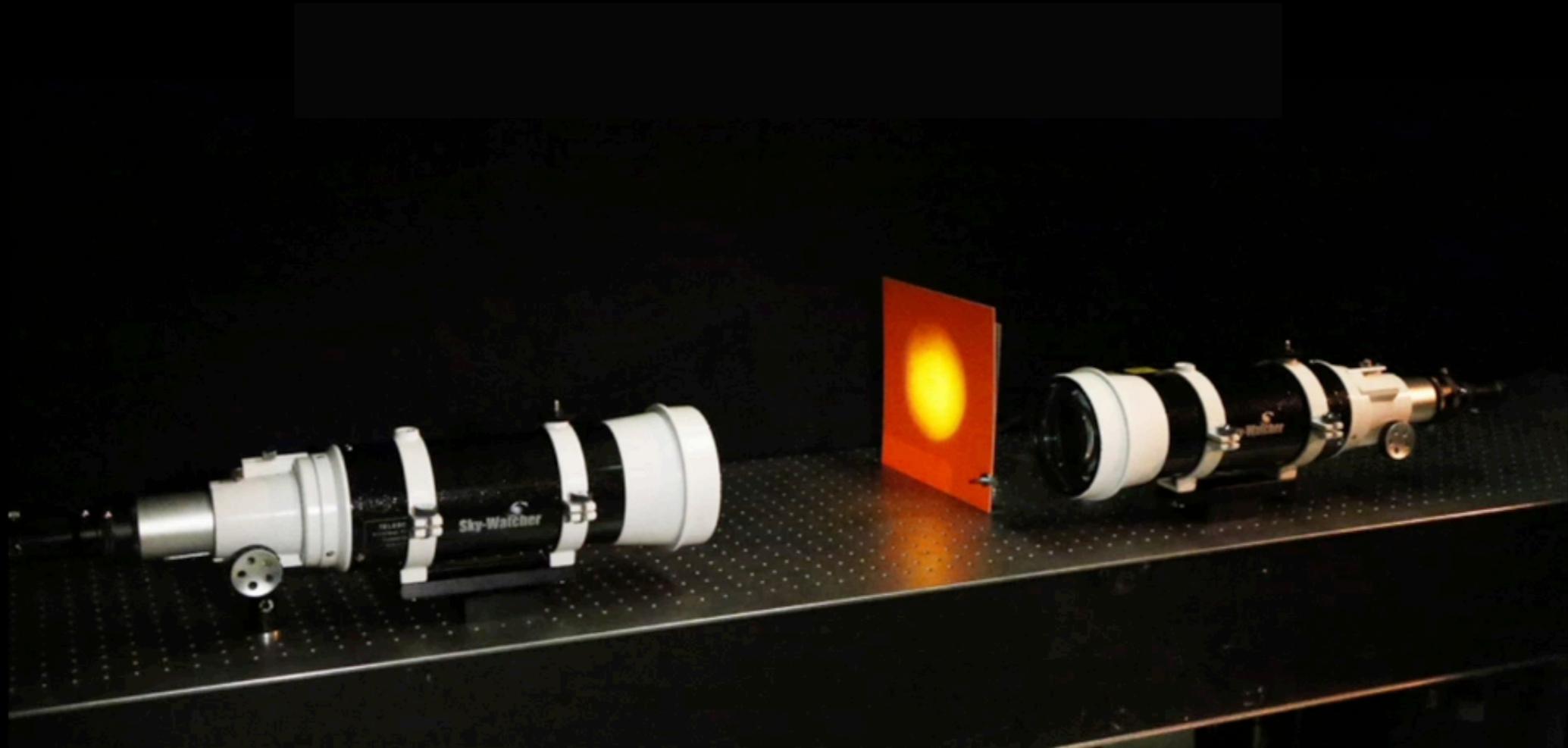
Okular



Projizierendes Fernrohr



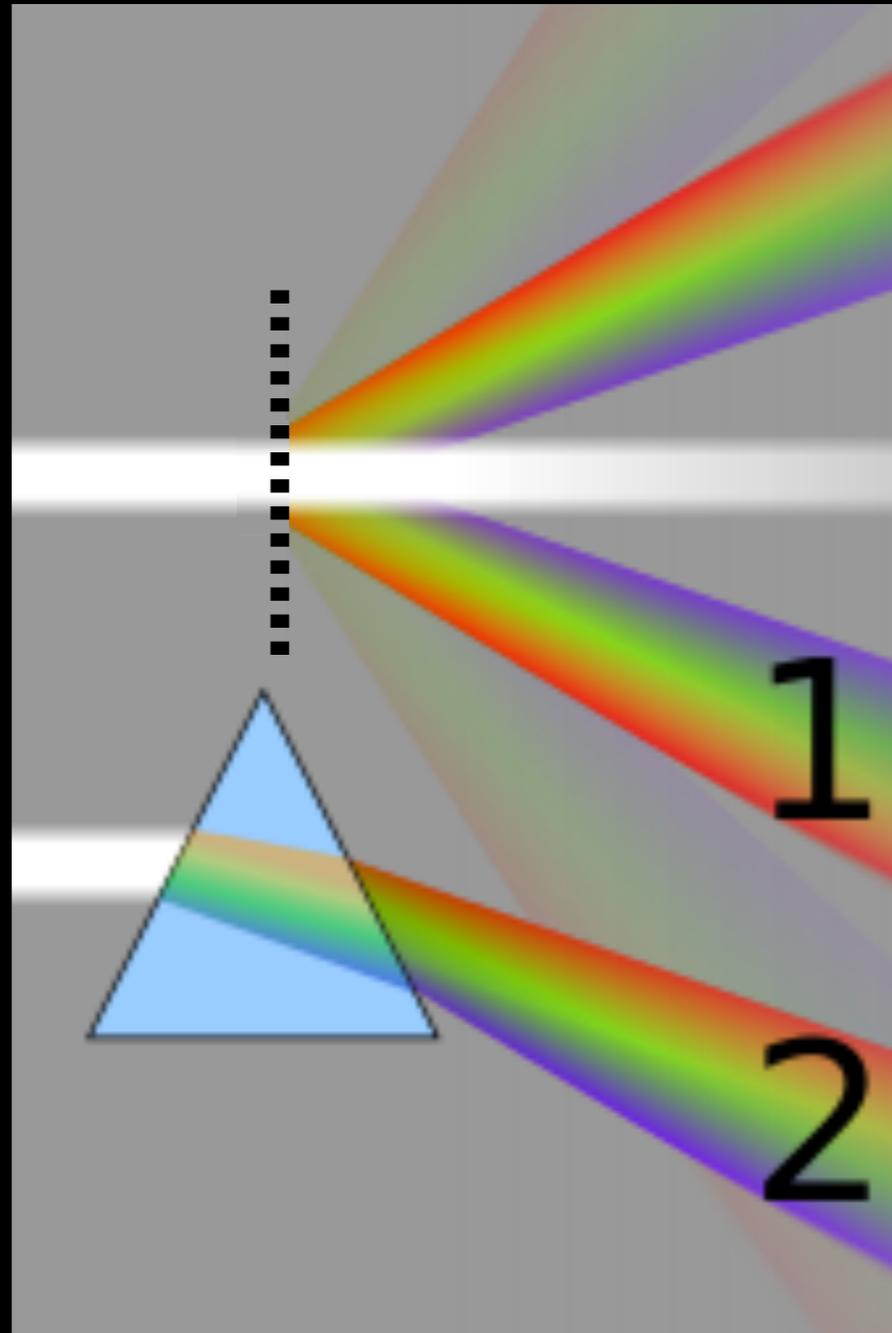
Gebeugtes Licht mit Fernrohr beobachten



Young's double slit experiment

YouTube: Young's Interference Experiment 720p

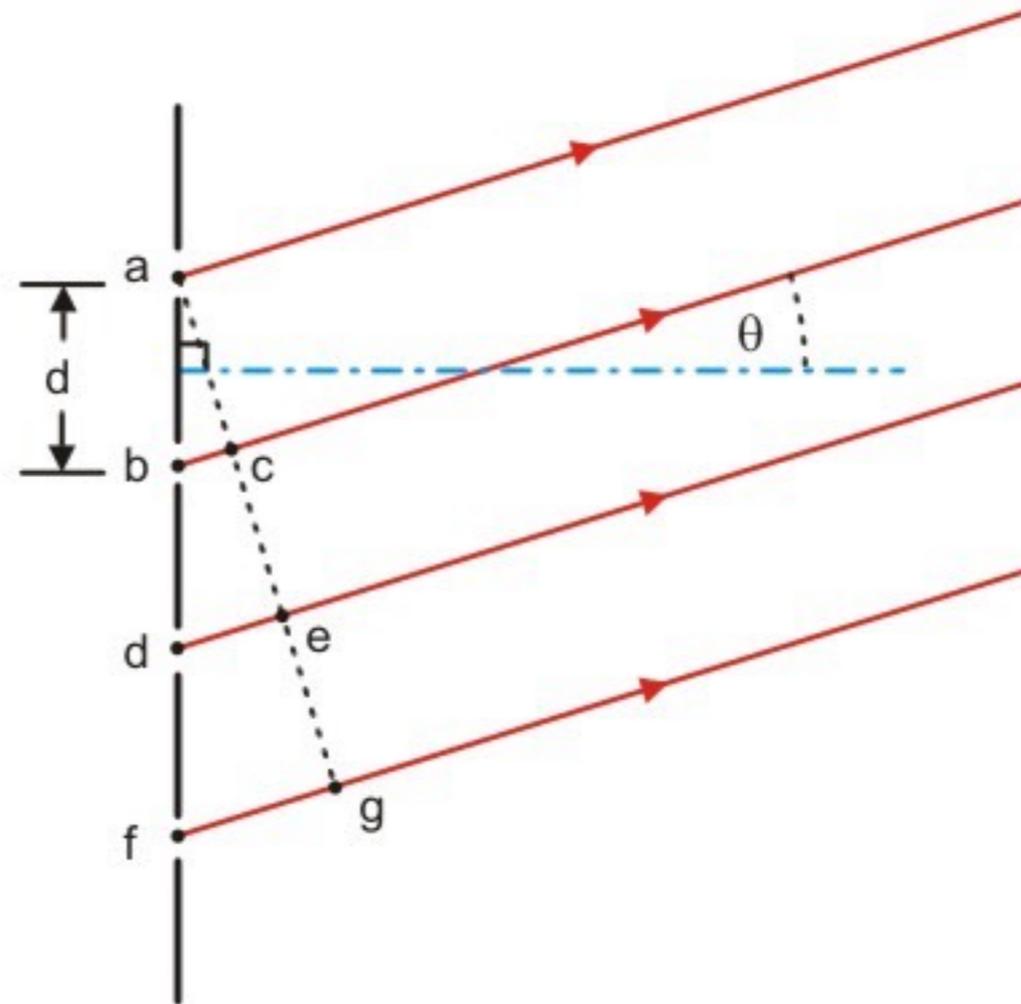
Zerlegung von Licht in Spektralfarben



Beugungsgitter

Prisma

Beugungsgitter



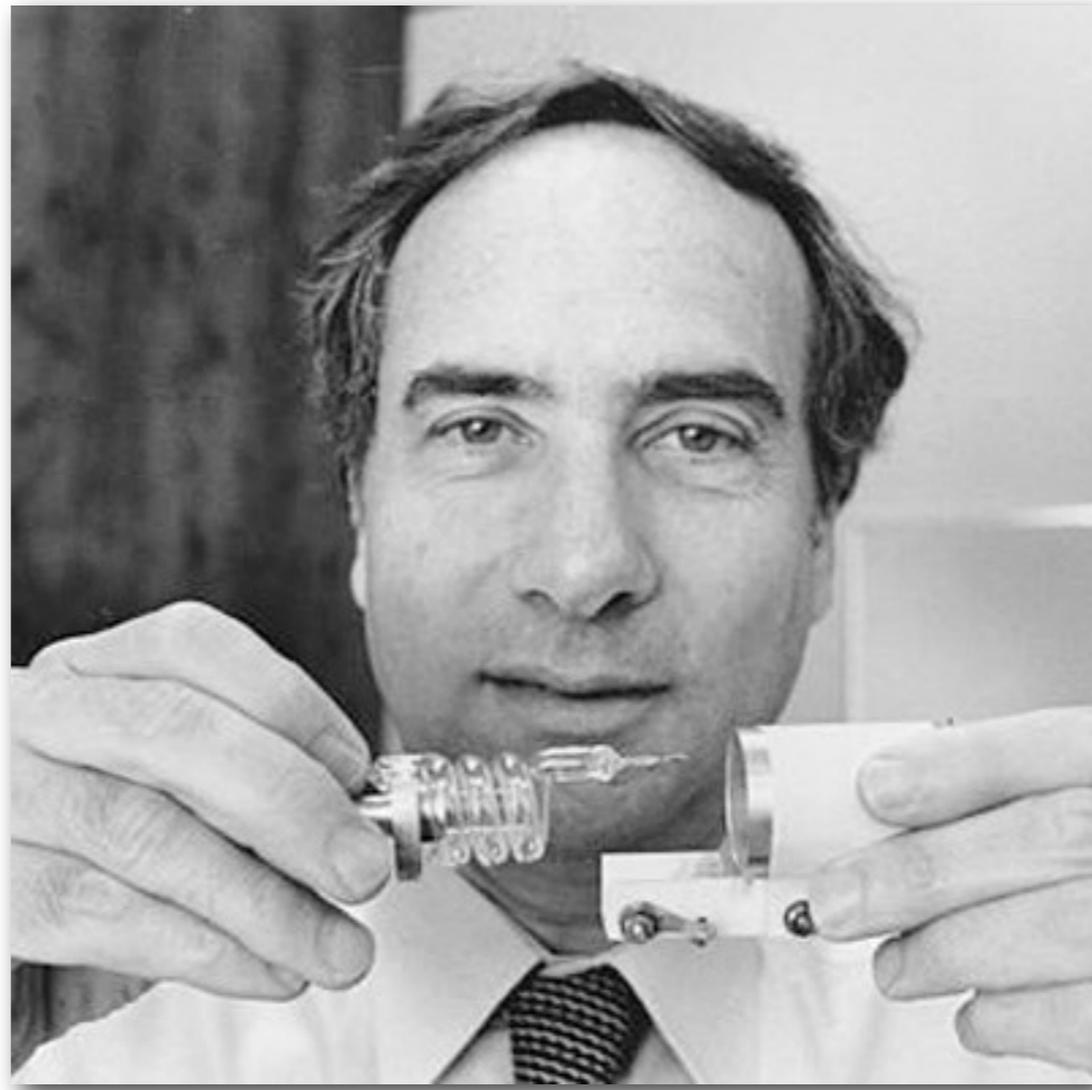
Diffraction Gratings

(c) TWH July 2014

Fresnel diffraction from a straight edge

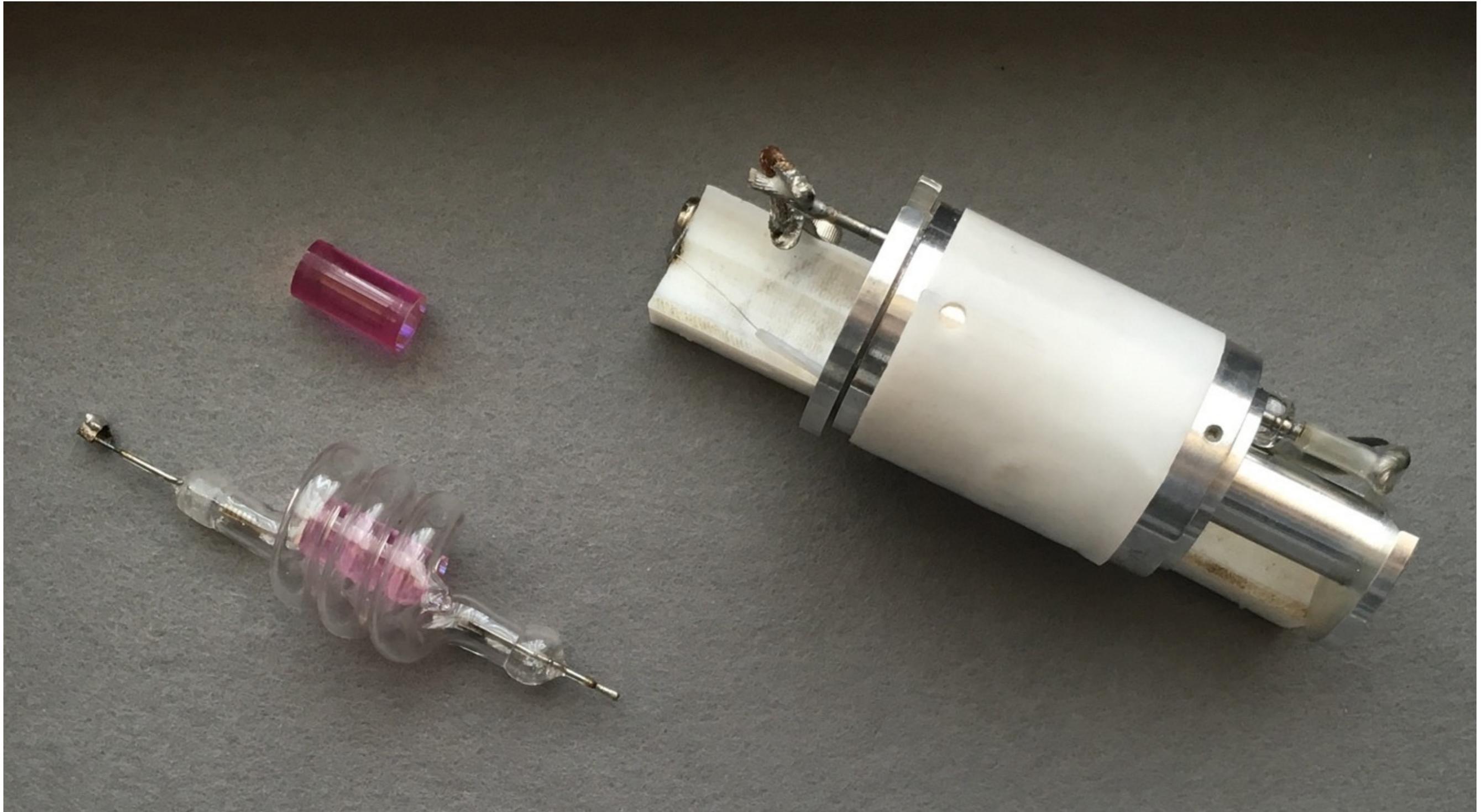
YouTube: Fresnel Diffraction Art

Vom Farbstofflaser zum Frequenzkamm



1960: Theodor Maiman und der erste Laser

Der erste Laser



Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching; Leihgabe von Kathleen Maiman, Vancouver



29 Nobel Preise rund um den Laser



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 112, NUMBER 6

DECEMBER 15, 1958

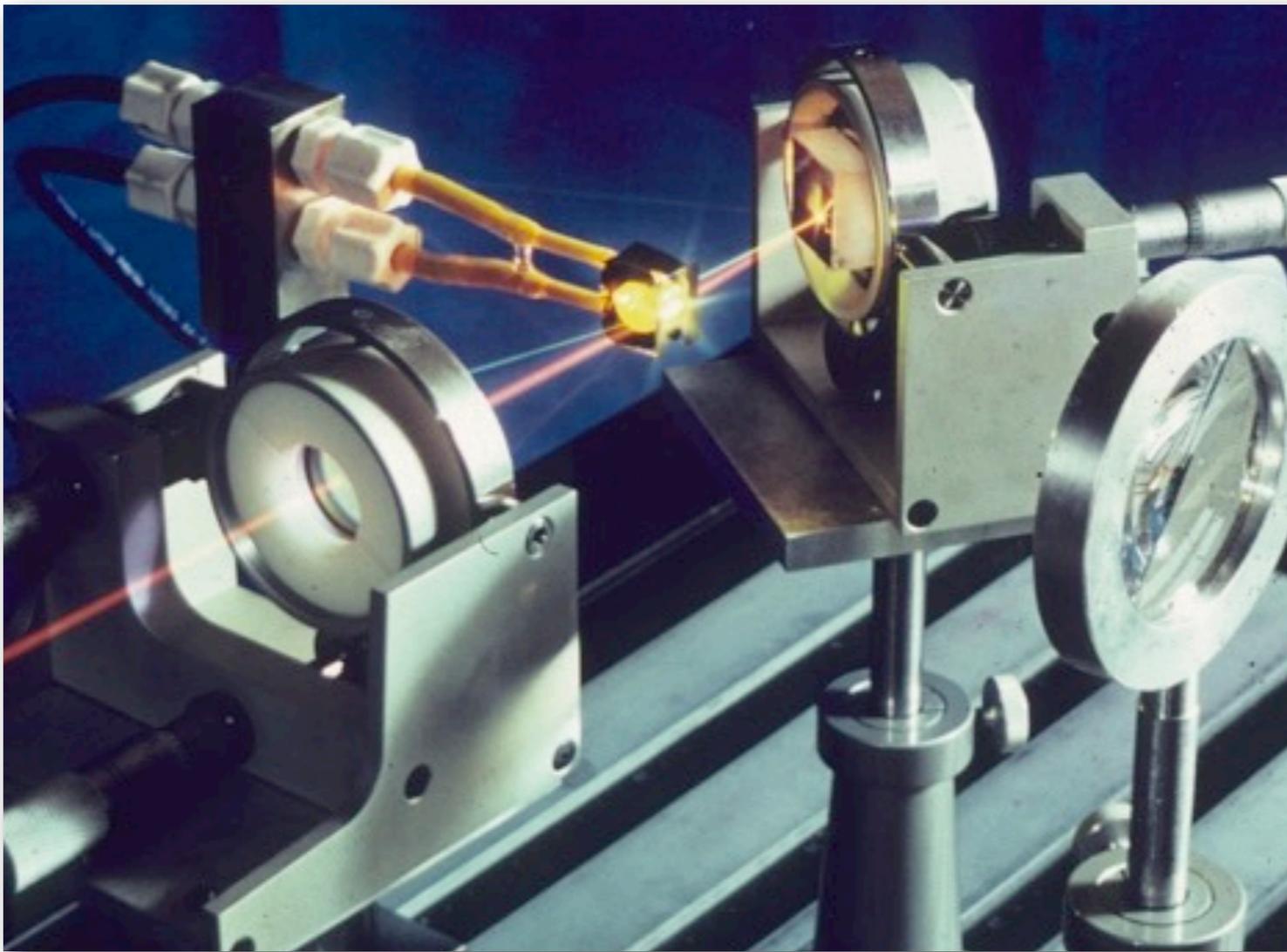
Infrared and Optical Masers

A. L. SCHAWLOW AND C. H. TOWNES*
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
(Received August 26, 1958)



Was hast Du entdeckt?

small things can make a
big difference





Closely bunched awards

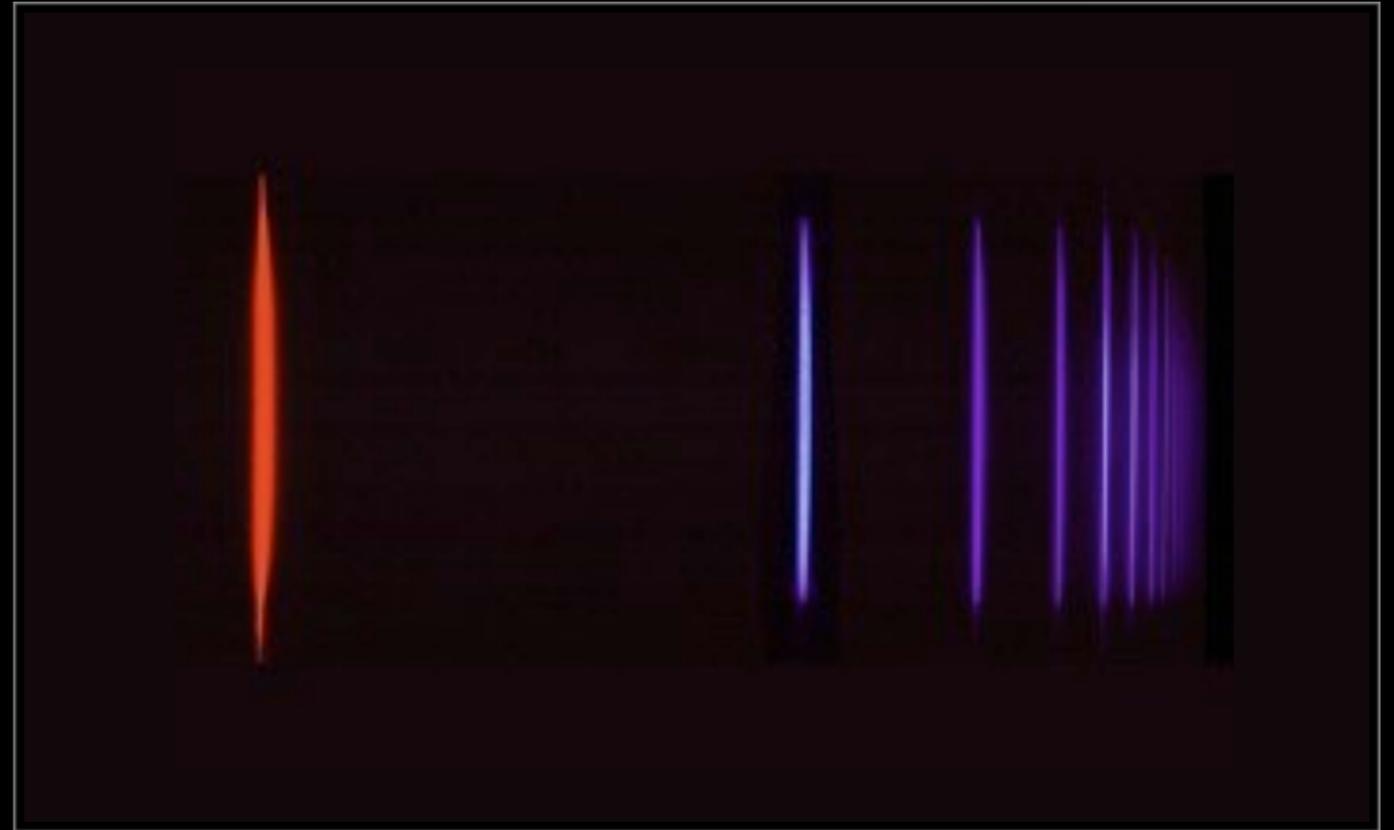
(AP Wirephoto)

Three of the four Midpeninsulans honored today display their awards. From left, they are Stanford physicists Theodor W. Hansch and Arthur L. Schalow and industrialist William R. Hewlett. Hewlett's partner, David Packard, was in Washington.

California Scientist of the Year 1973

Wasserstoff

Balmer Spektrum

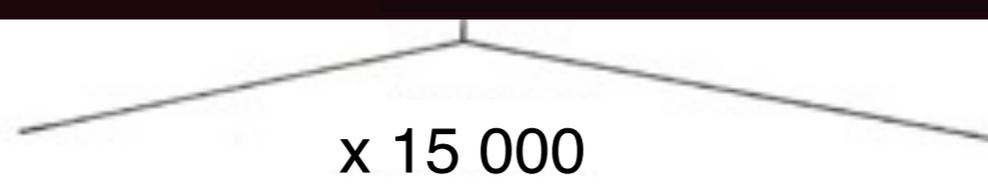
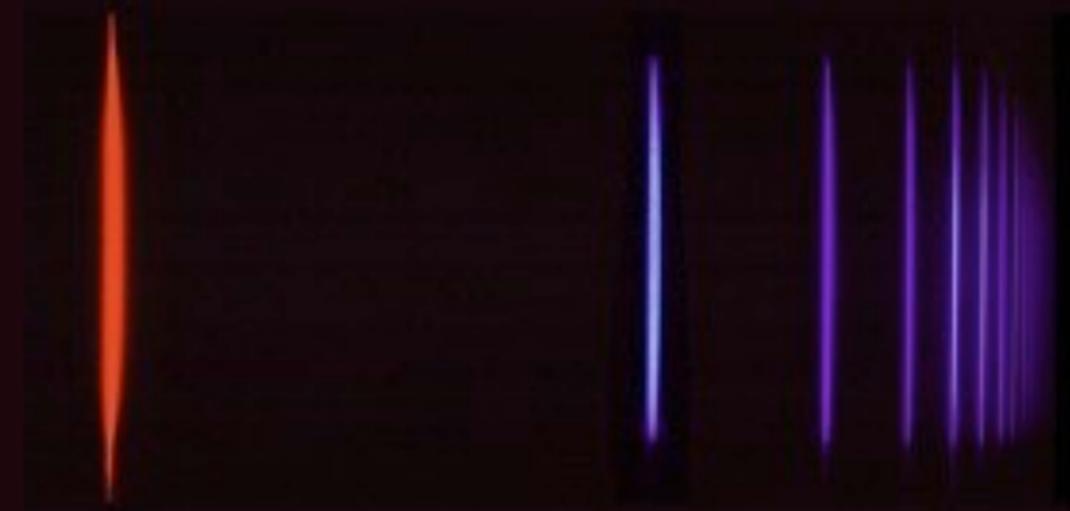


Rosetta Stein für die Entzifferung
der merkwürdigen Spielregeln der Quantenphysik

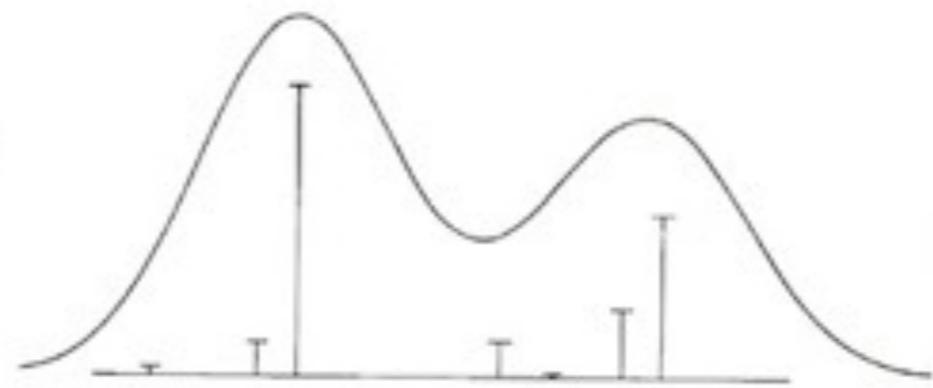


Eta Carinae

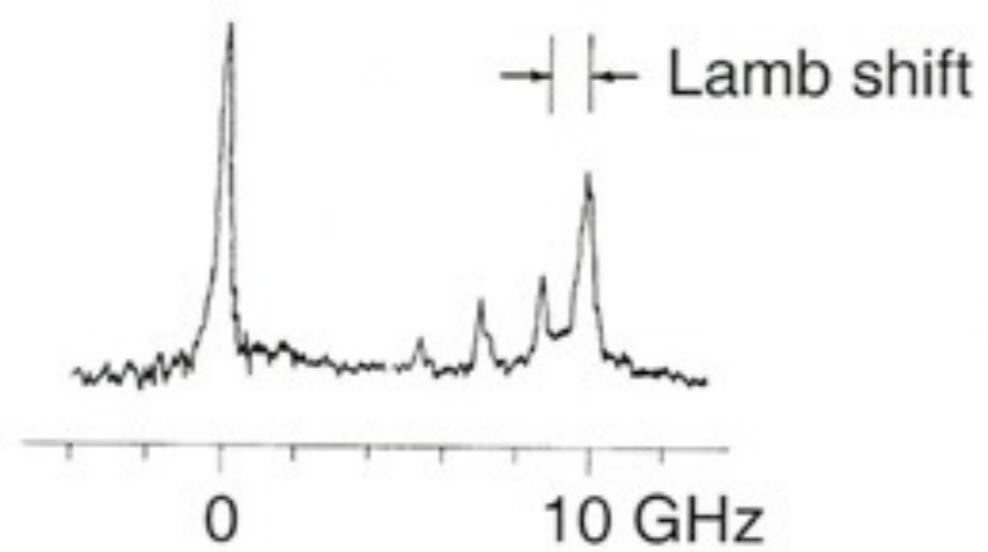
Wasserstoff Balmer Spektrum



H $_{\alpha}$
Doppler
profile
(300 K)

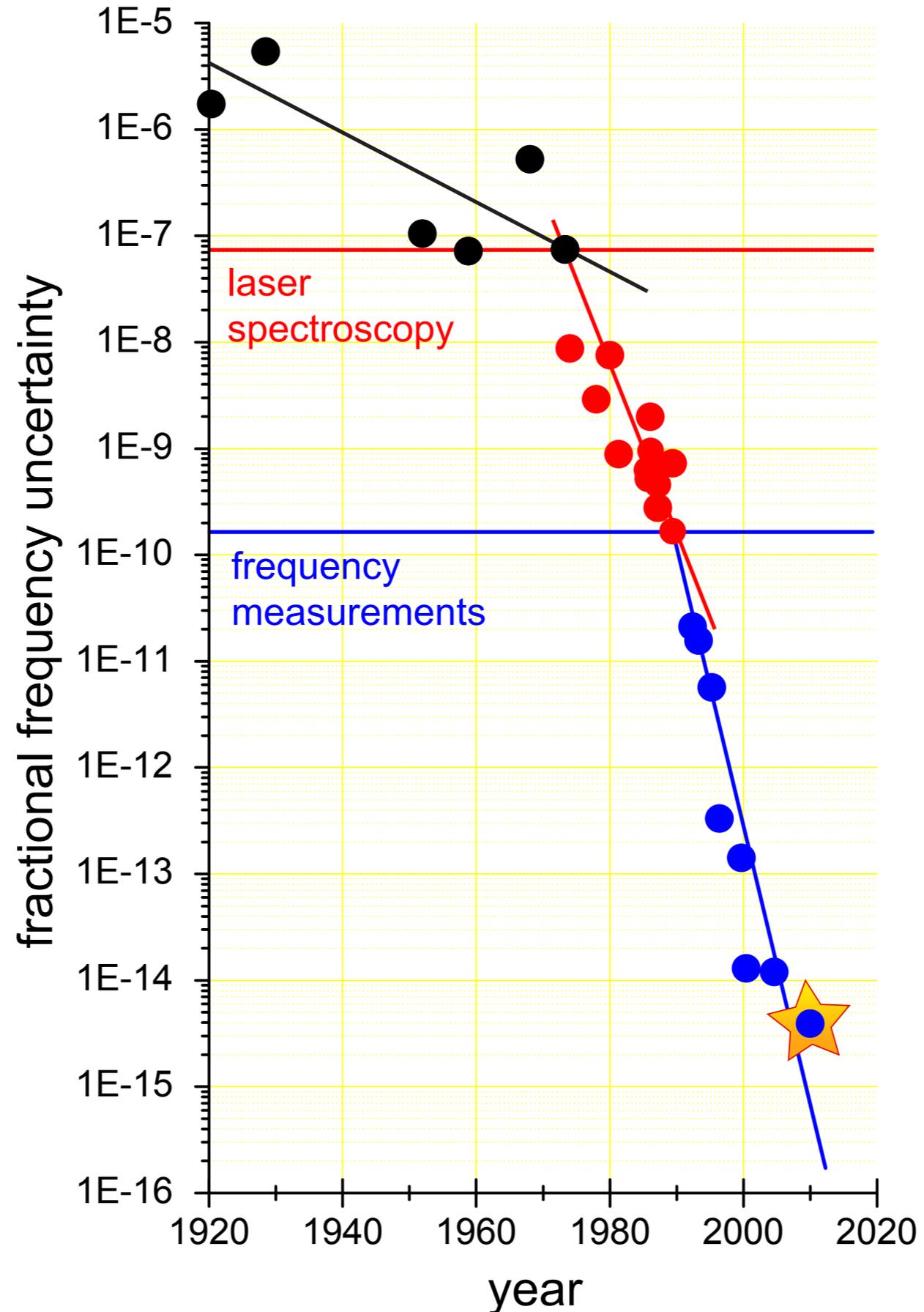


saturation
spectrum

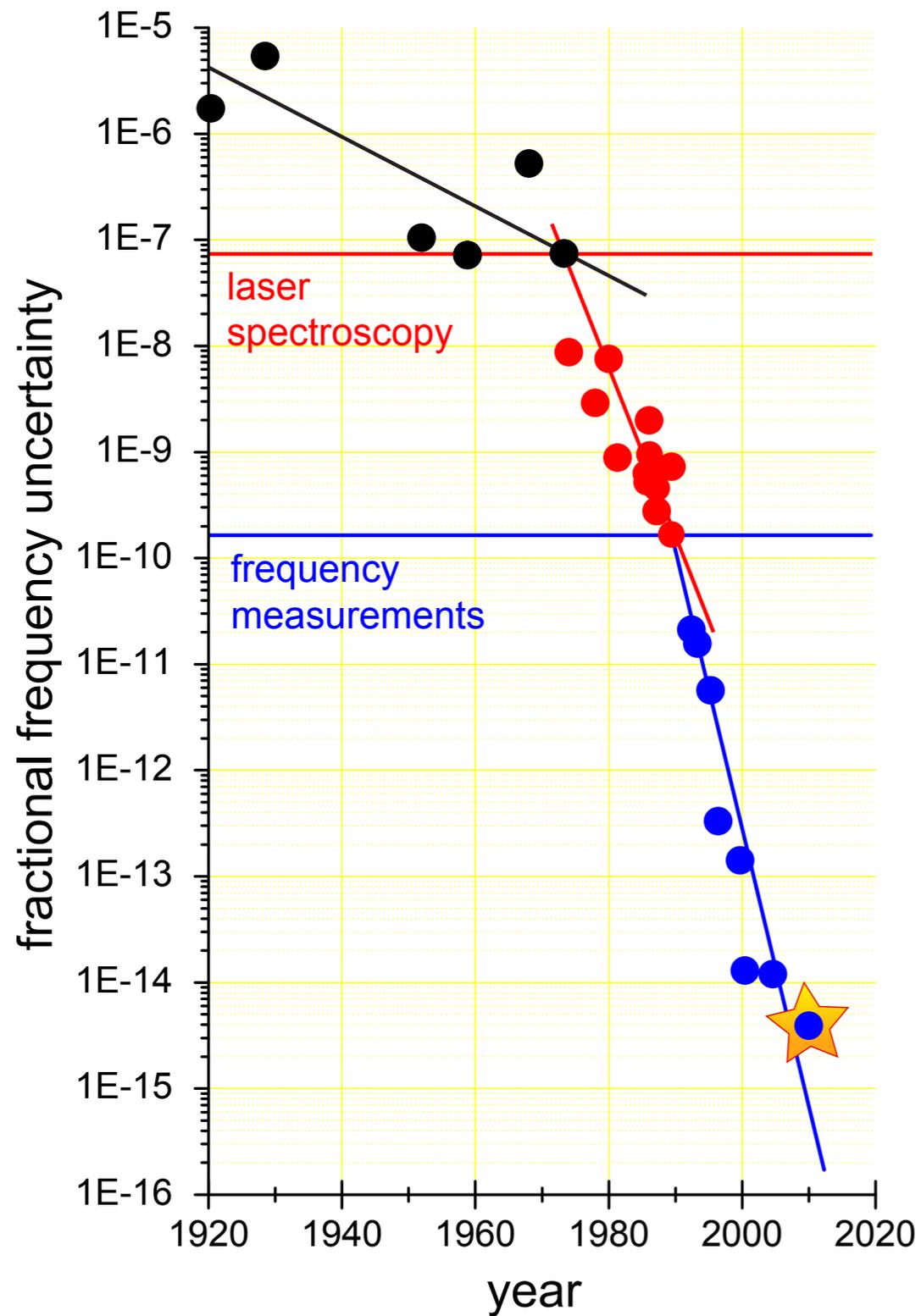


T.W. Hänsch, I.S. Shahin,
and A.L. Schawlow,
Nature **235**, 63 (1972)

Optical Spectroscopy of Hydrogen



Optical Spectroscopy of Hydrogen



Motivation für Erfindungen:

1970 ... :

Doppler-freie Spektroskopie

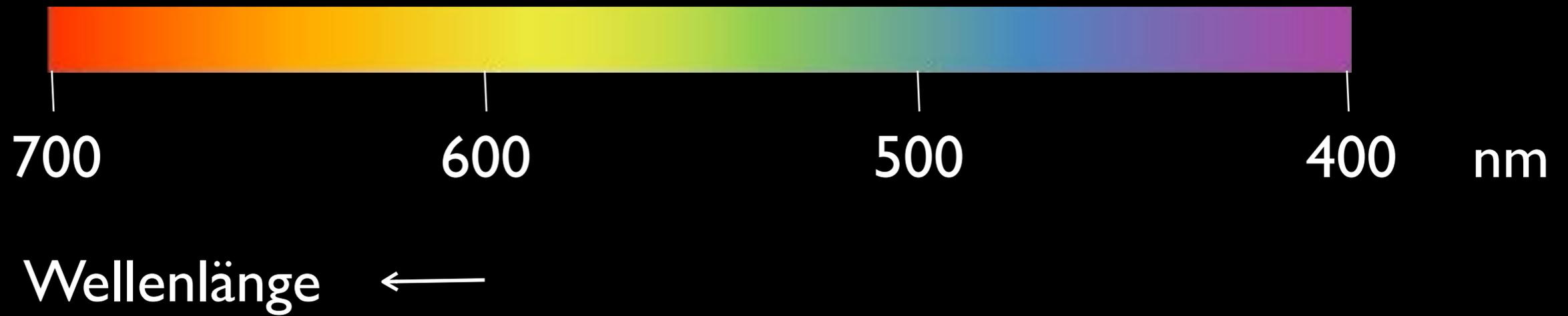
Laser Kühlung

1990s:

Frequenzkamm



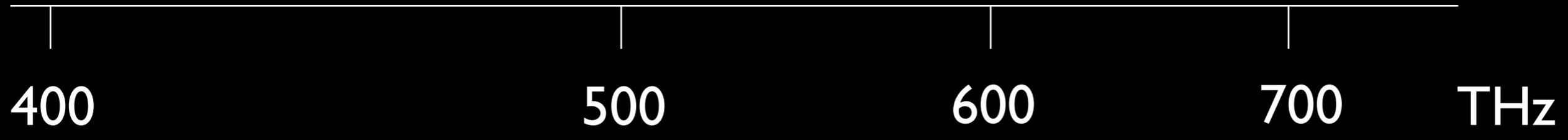
Wellenlänge ←



$$\text{Frequenz} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{\text{Wellenlänge}}$$



Wellenlänge ←



→ Frequenz

$$\text{Frequenz} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{\text{Wellenlänge}}$$

First Phase-Coherent Frequency Measurement of Visible Radiation

H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle, and G. Zinner
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), D-38116 Braunschweig, Germany
 (Received 10 August 1995)

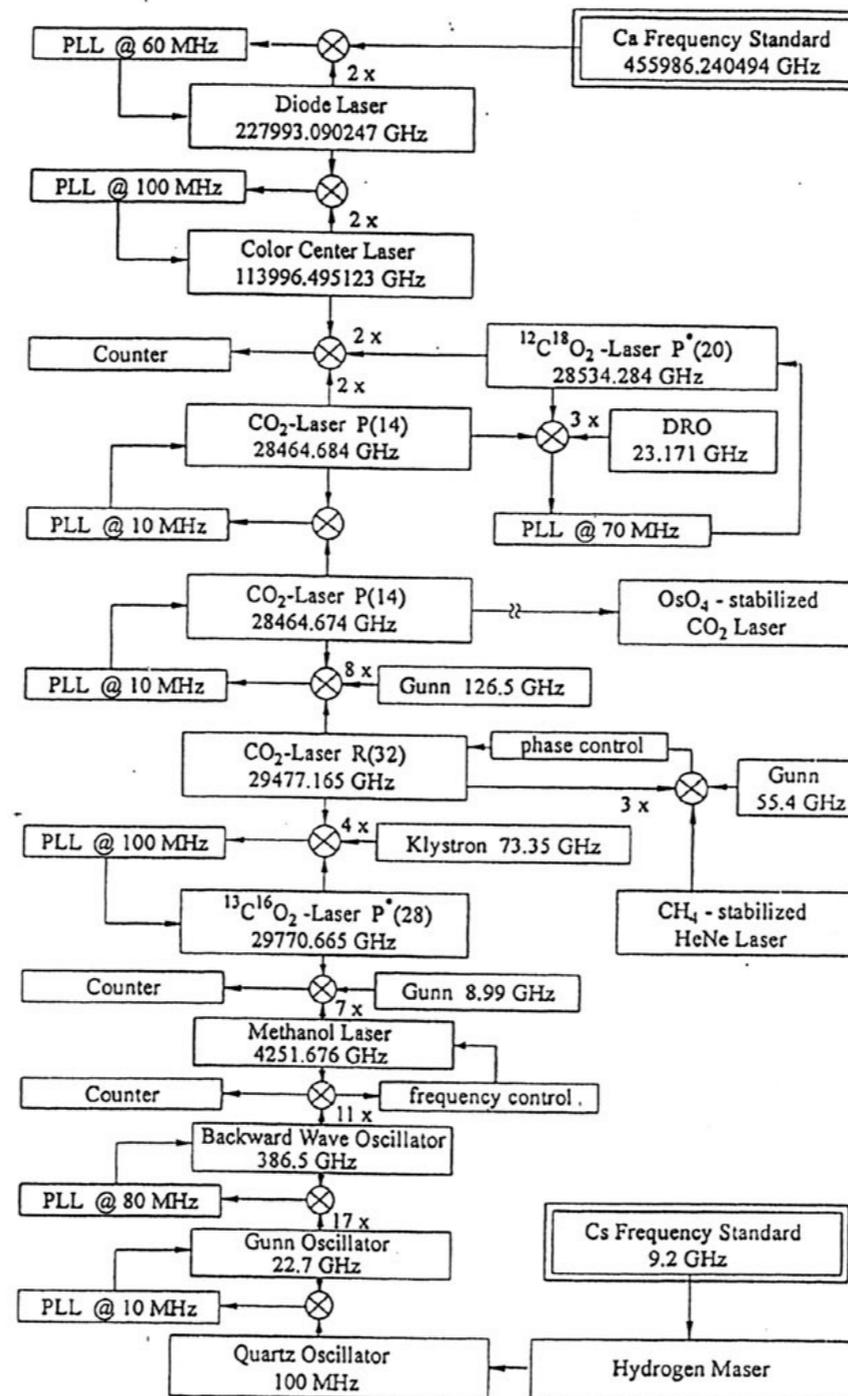


FIG. 1. PTB's frequency chain to the Ca intercombination line (PLL = phase locked loop, details are given in the text).

Neue Zürcher Zeitung

INTERNATIONALE AUSGABE

Verlag: Neue Zürcher Zeitung AG, Postfach, CH-8002 Zürich, Telefon (0041) 0220 11 11, Telefax (0041) 0220 11 20, Internet: <http://www.nzz.ch>
Abonnements: Postfach 10, CH-8002 Zürich, Telefon (0041) 0220 11 11, Telefax (0041) 0220 11 20, E-Mail: abonn@nzz.ch, Fax: (0041) 0220 11 20, Internet: <http://www.nzz.ch>
Druck: Druckerei der NZZ, Postfach 10, CH-8002 Zürich, Telefon (0041) 0220 11 11, Telefax (0041) 0220 11 20, E-Mail: druck@nzz.ch, Fax: (0041) 0220 11 20, Internet: <http://www.nzz.ch>

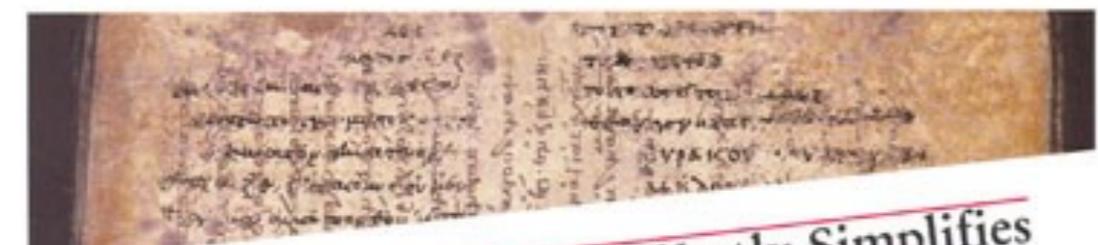
Räderwerke für eine optische Uhr Femtosekunden-Laserpulse als hochpräziser Massstab

Gespeicherte Ionen, die mit optischen Frequenzen schwingen, könnten zur Grundlage eines zukünftigen Frequenzstandards werden. Hierzu müssen sich die Ionen allerdings an den heute gebräuchlichen Cäsium-Atomuhren messen lassen. Dieser Vergleich setzt ein solches Uhrwerk ist nun von deutschen Forschern entwickelt worden.

Spe. Keine physikalische Einheit lässt sich genauer messen als die Zeit. Die besten Atomuhren messen pro Tag nur Bruchteile einer Milliardstel Sekunde. Für praktische Belange ist dies jedoch nicht gut genug. In der Zukunft soll ein solches Uhrwerk entwickelt werden, das die Zeit mit einer Genauigkeit von einem Teil des Intervalls auf andere Art messen kann. Diesem Ziel hat sich ein Team von Theodor Hänsch vom MPI für Quantenoptik bereits vor zwei Jahren demonstriert. Bei Intervallen von einigen hundert Terahertz ist diese Art von Uhrwerk allerdings überfordert, weil zu viele «Zahnräder» – sprich Teilerstufen – erforderlich wären. Die Forscher haben aber eine Möglichkeit gefunden, die das Problem löst: Sie haben hierzu einen

PHYSICS TODAY

JUNE 2000



Femtosecond Comb Technique Vastly Simplifies Optical Frequency Measurements

A recent measurement of the transition frequency between the 1S and 2S states of hydrogen has now reached a precision of 1.8 parts in 10^{14} . As the precision of optical spectroscopy has developed, further improvements appear to be getting easier instead of harder. So says Theodor Hänsch, of the Max Planck Institute of Quantum Optics in Munich, Germany (near Munich).

▶ A laser frequency comb lets you do away with a factory full of generators and lasers.

space between the modes (the teeth) is just the pulse repetition rate. With such a frequency comb, they believed one could eventually eliminate the frequency multiplying chain. Later, Veniamin Chebotayev (Institute of Laser Physics in Novosibirsk, Russia) had similar ideas.

Two decades ago, only picosecond lasers were available. Because the spectral width of these short-pulse lasers varies inversely with the pulse length, only the advent of femtosecond lasers made it possible to directly reach terahertz frequencies.

Recently, Hänsch and his collaborators demonstrated the use of a mode-locked femtosecond laser as a comb generator² to measure absolute optical frequencies. They have applied for a patent on the comb technique – for controlling not only the spacing of the teeth, but also the absolute posi-

PHYSICS TODAY

AUGUST 1999 PART 1



▶ OPTICAL AND RADIO FREQUENCIES can now be compared to a few parts in 10^{17} or better. Because of the reciprocal relationship between time and frequency, a very short pulse of laser light (for example, a femtosecond wavepacket) contains a very wide range of frequencies. Within the lasing cavity, each frequency, or mode, is reflected separately. When the phases of all the modes match, then the entire wavepacket sloshes back and forth coherently, and the spectrum of the train of output pulses resembles a comb, with the regularly spaced teeth separated by the pulse repetition rate.

PhysicsWorld

OCTOBER 2000

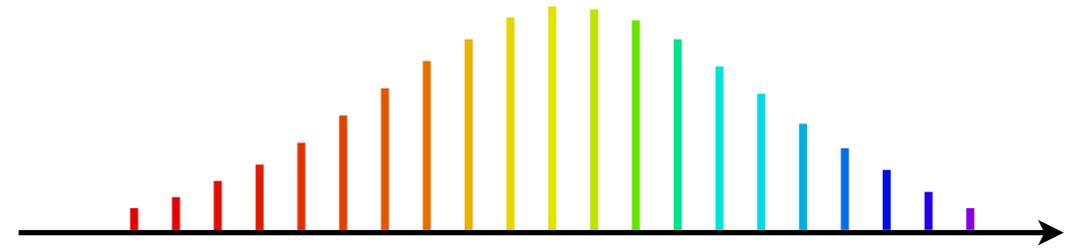
VOLUME 13 NO 10

Theoretical voyages to the centre of the Earth Quark plasmas PhDs: where to go and what to do

Frequency chains get short shift

One of the

Laser Frequenzkamm

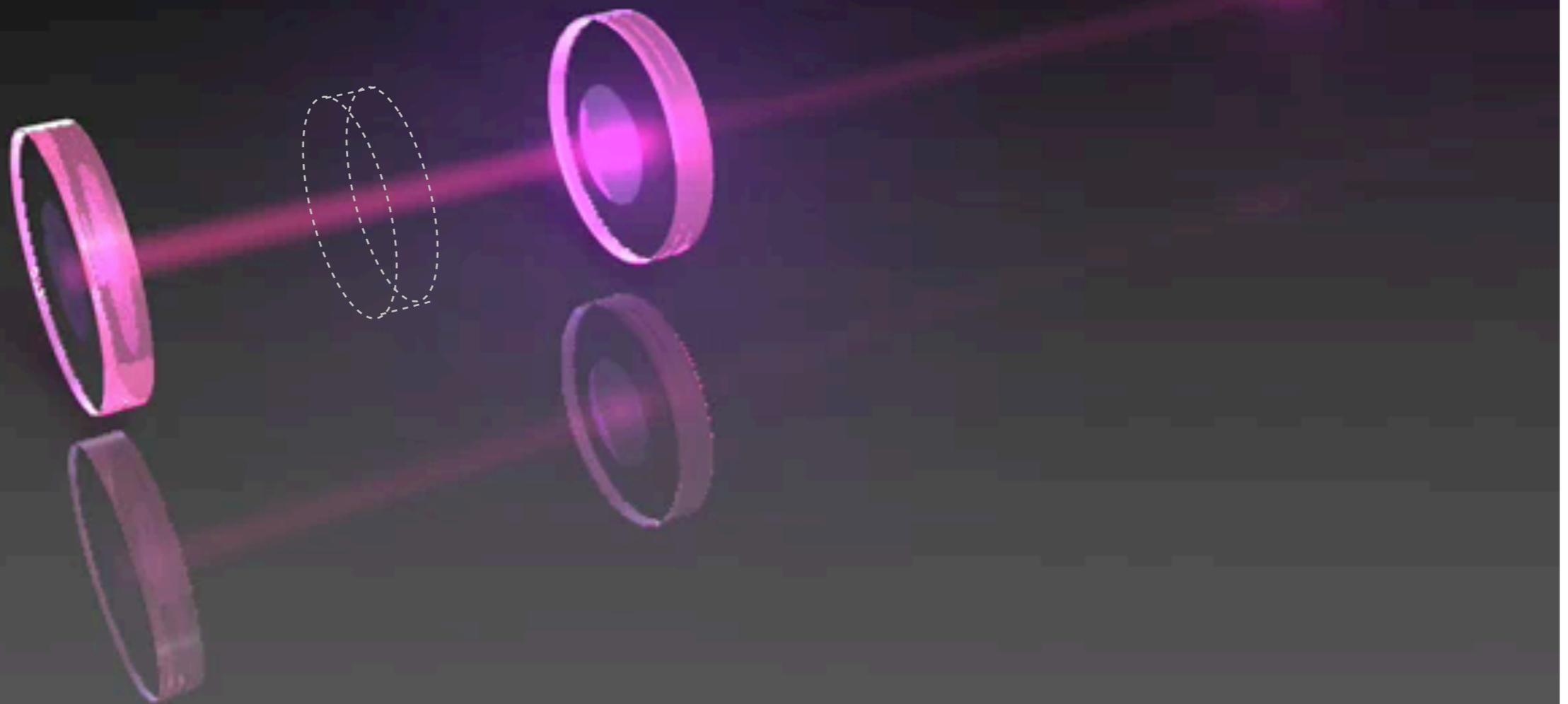


Einfaches Werkzeug zur Messung der Frequenz von Licht

Brücke zwischen optischen Frequenzen und Radiofrequenzen

Uhrwerk für optische Atomuhren

Laser Frequenzkamm

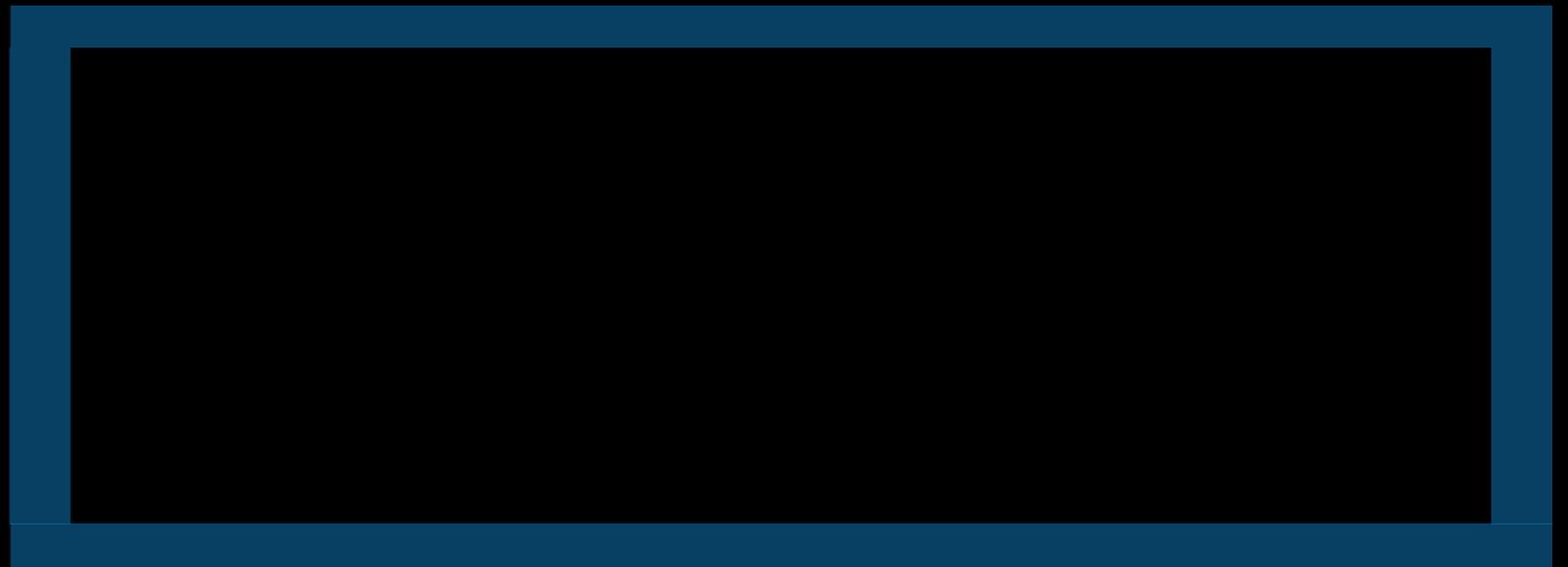


Ein Puls

Laser



Spektrometer



Zwei Pulse

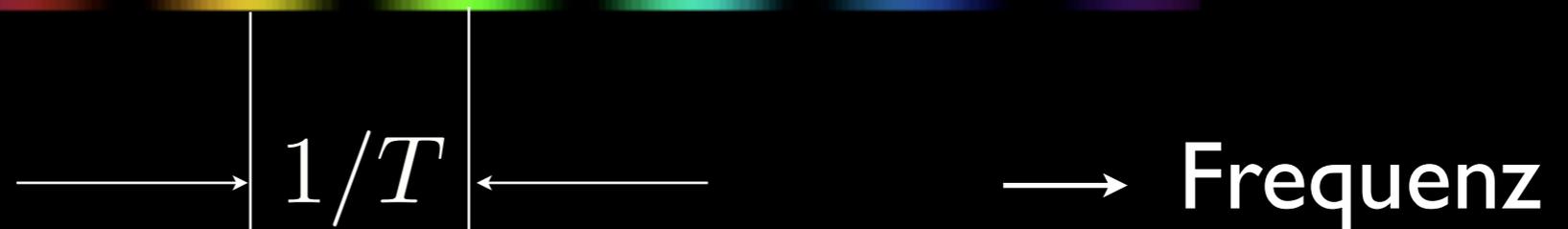
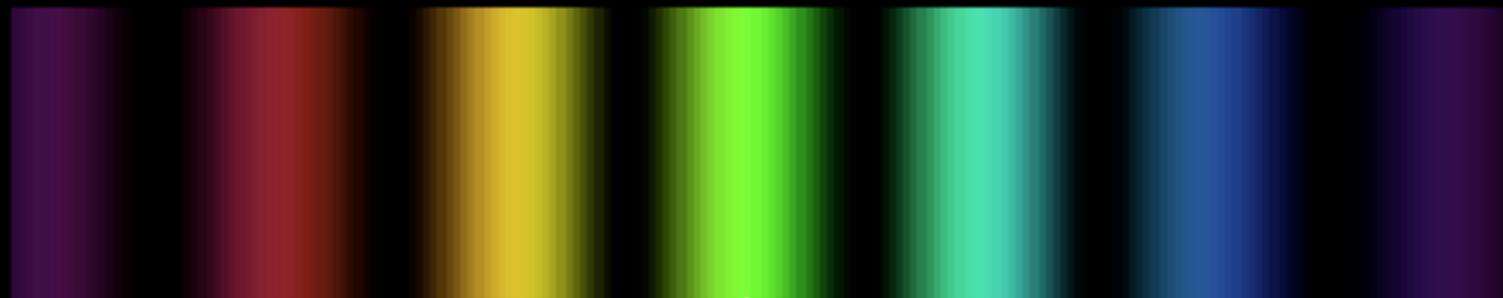
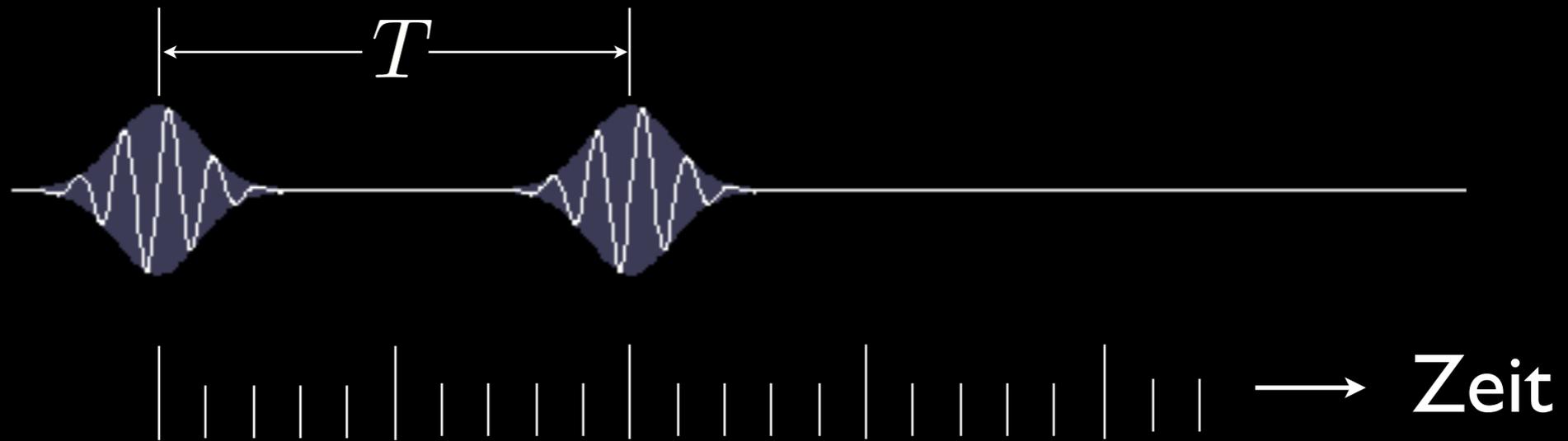
Laser



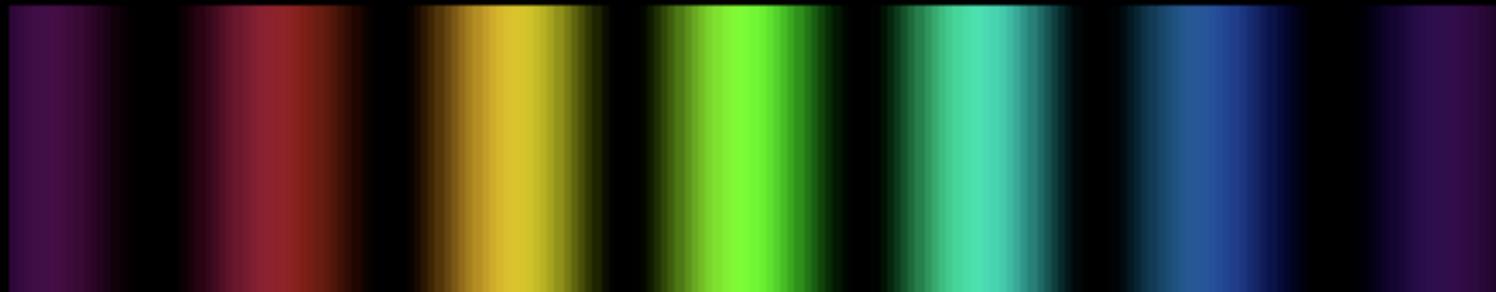
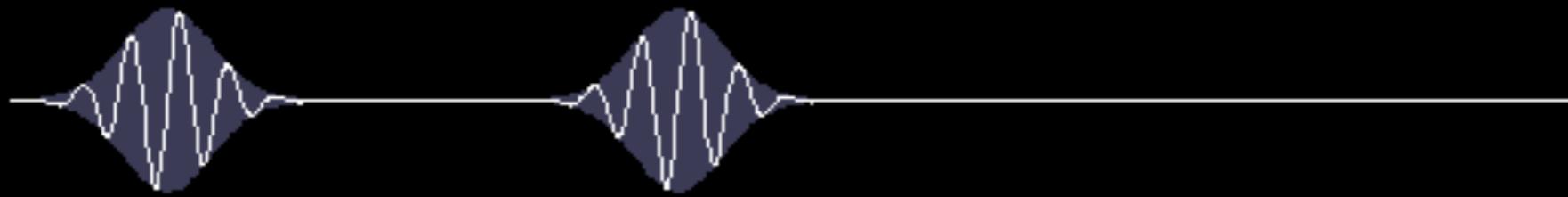
Spektrometer



Zwei Pulse



Zwei Pulse

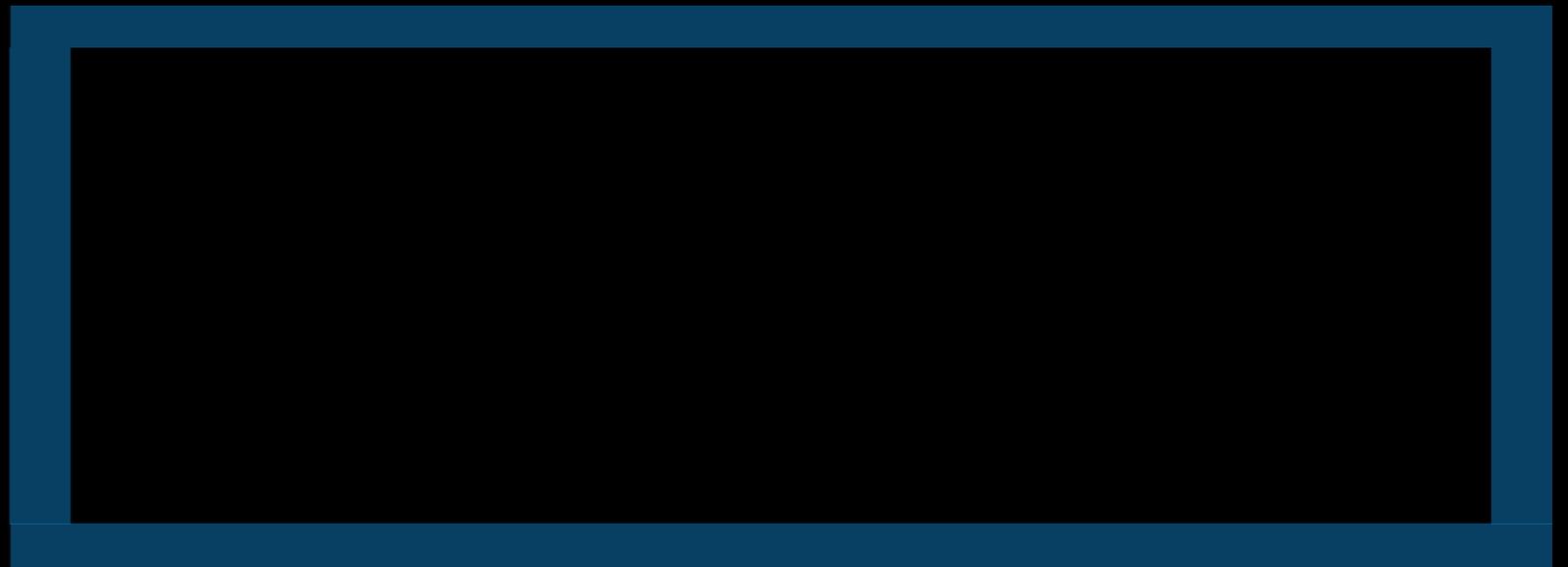


→ Frequenz

Viele Pulse

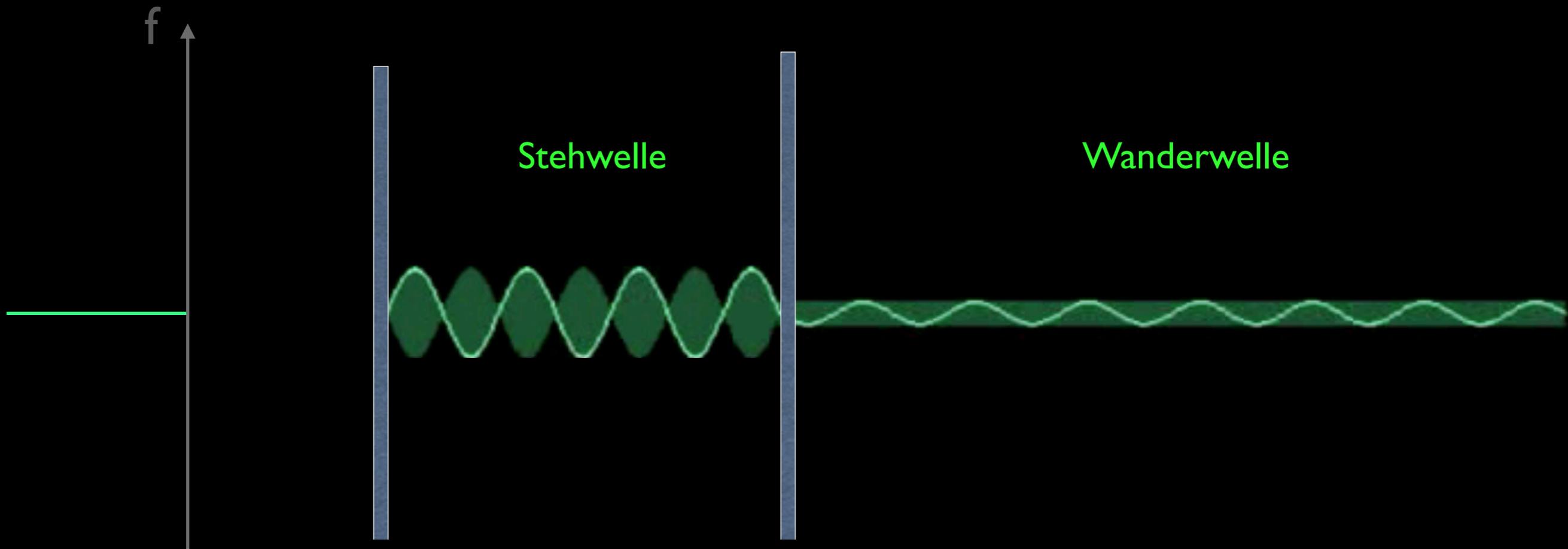
Laser

Spektrometer

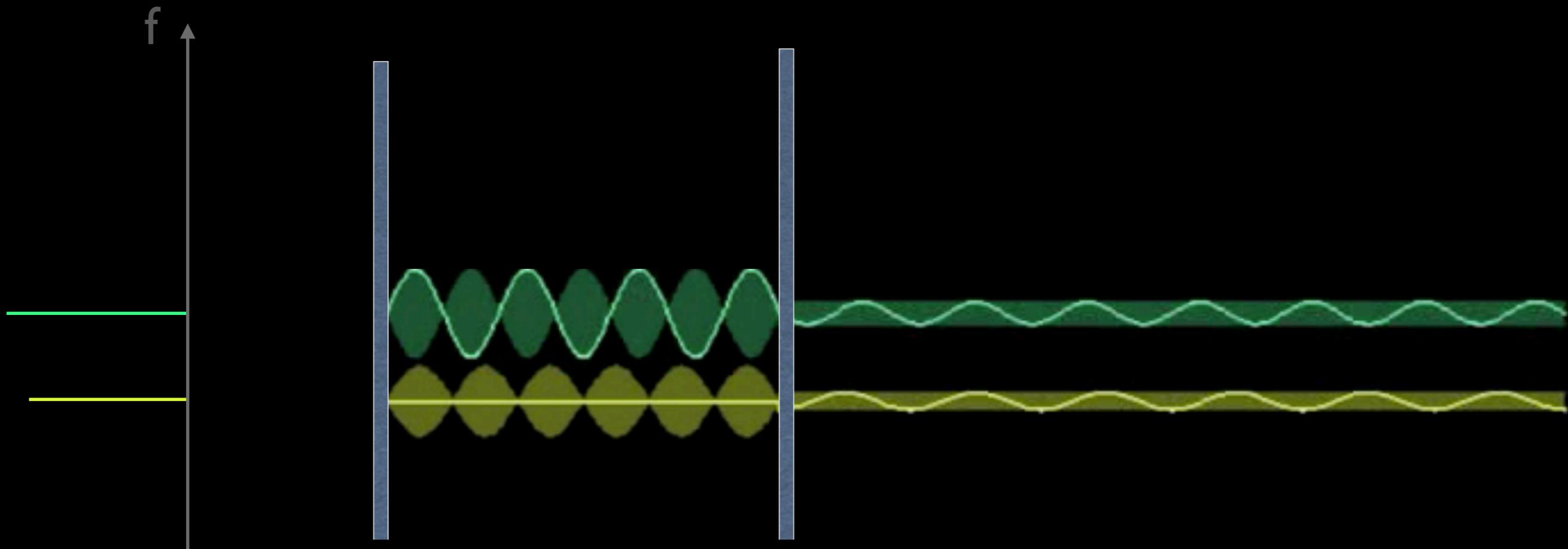


Präzise Zeitkontrolle

eine Mode

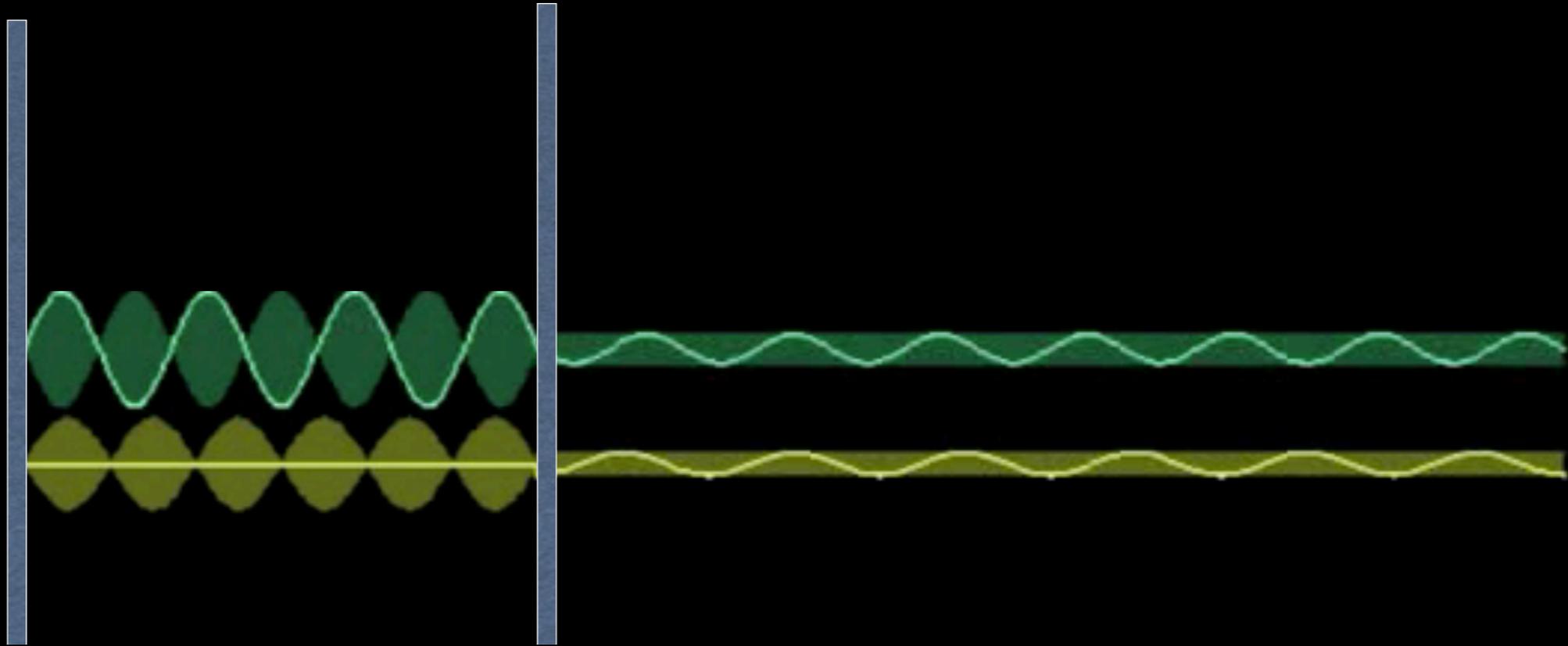


zwei Moden



zwei Moden

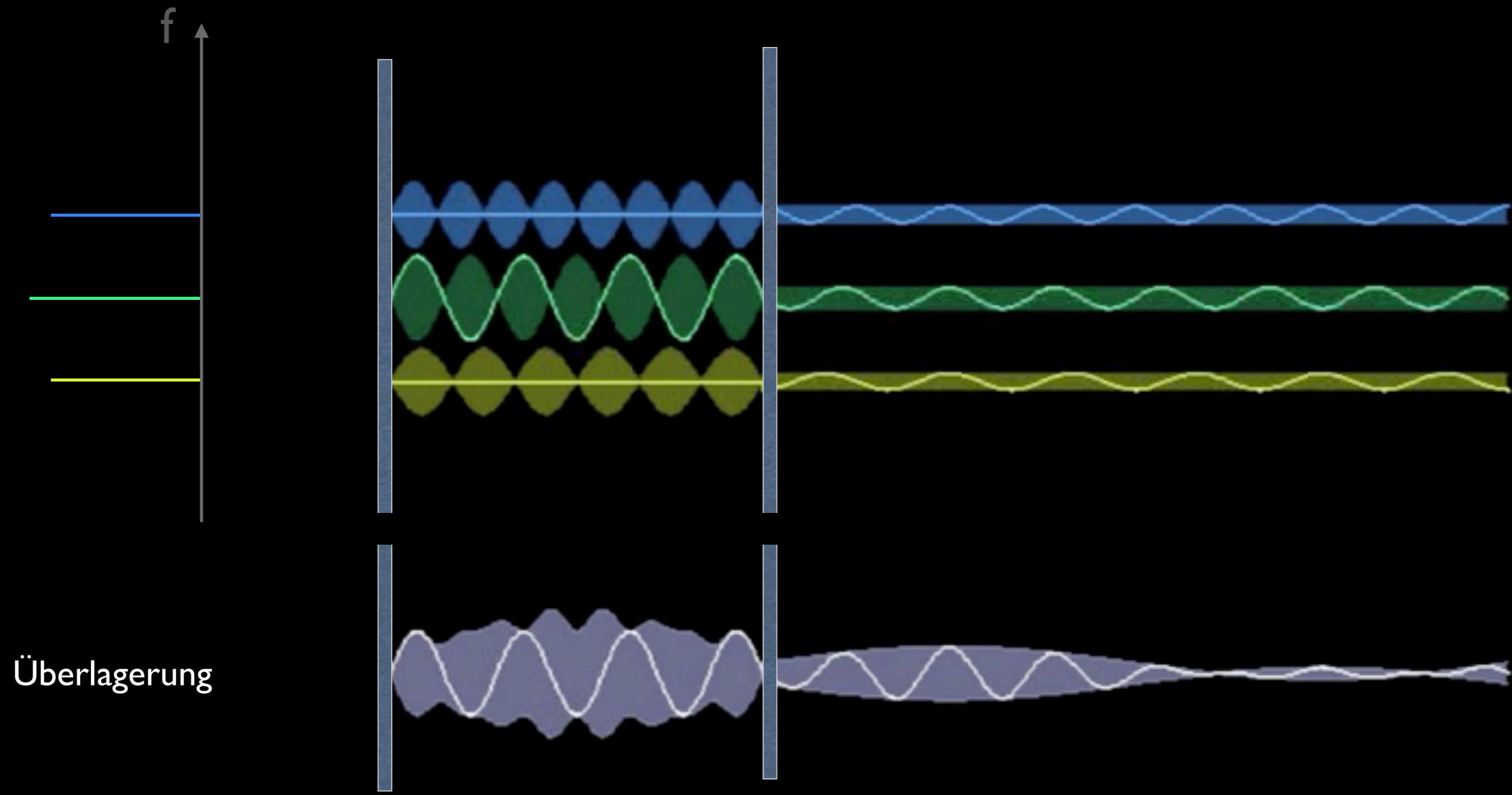
f ↑



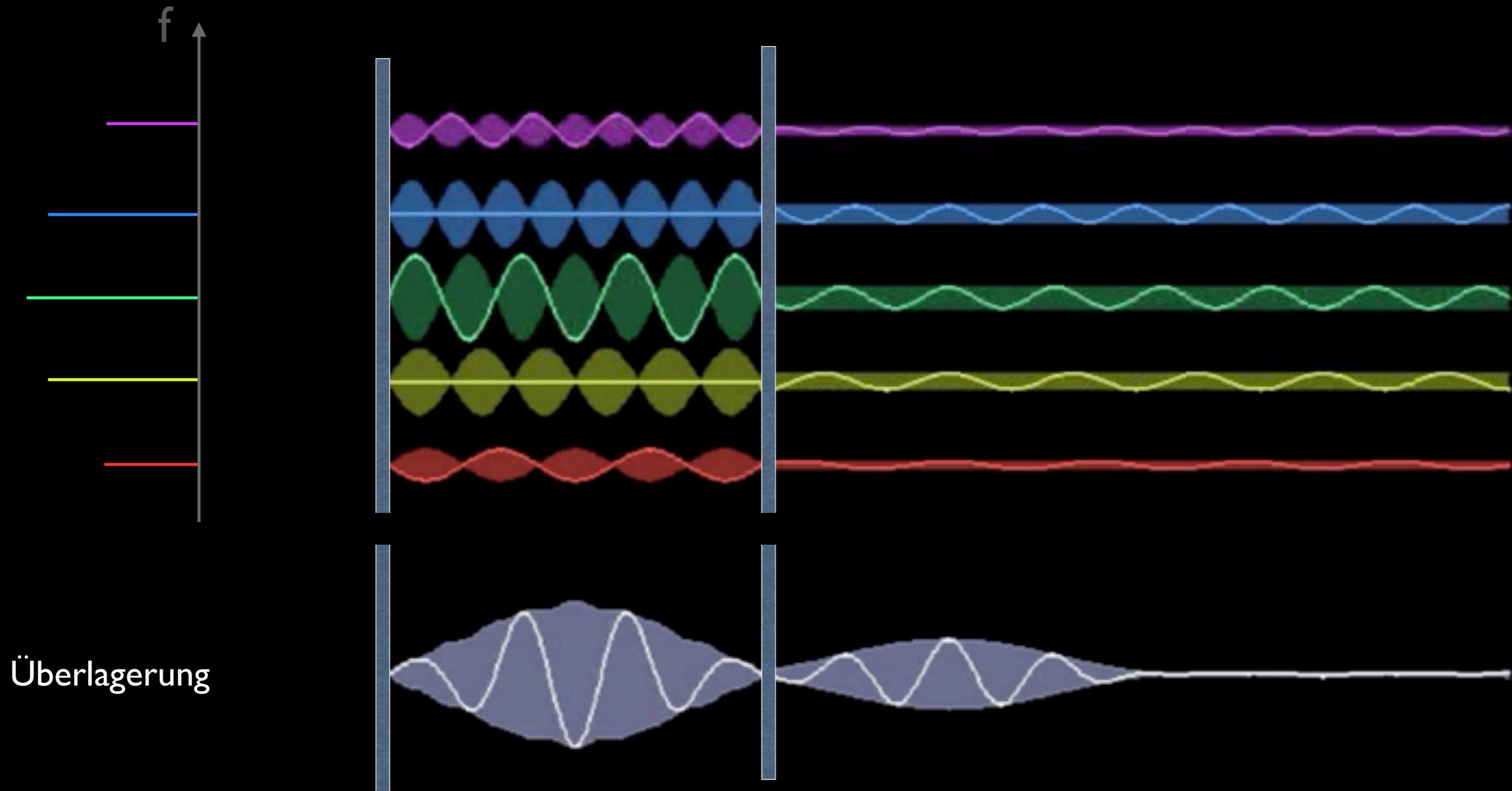
Überlagerung



drei Moden



viele Moden



mechanischer Frequenzkamm

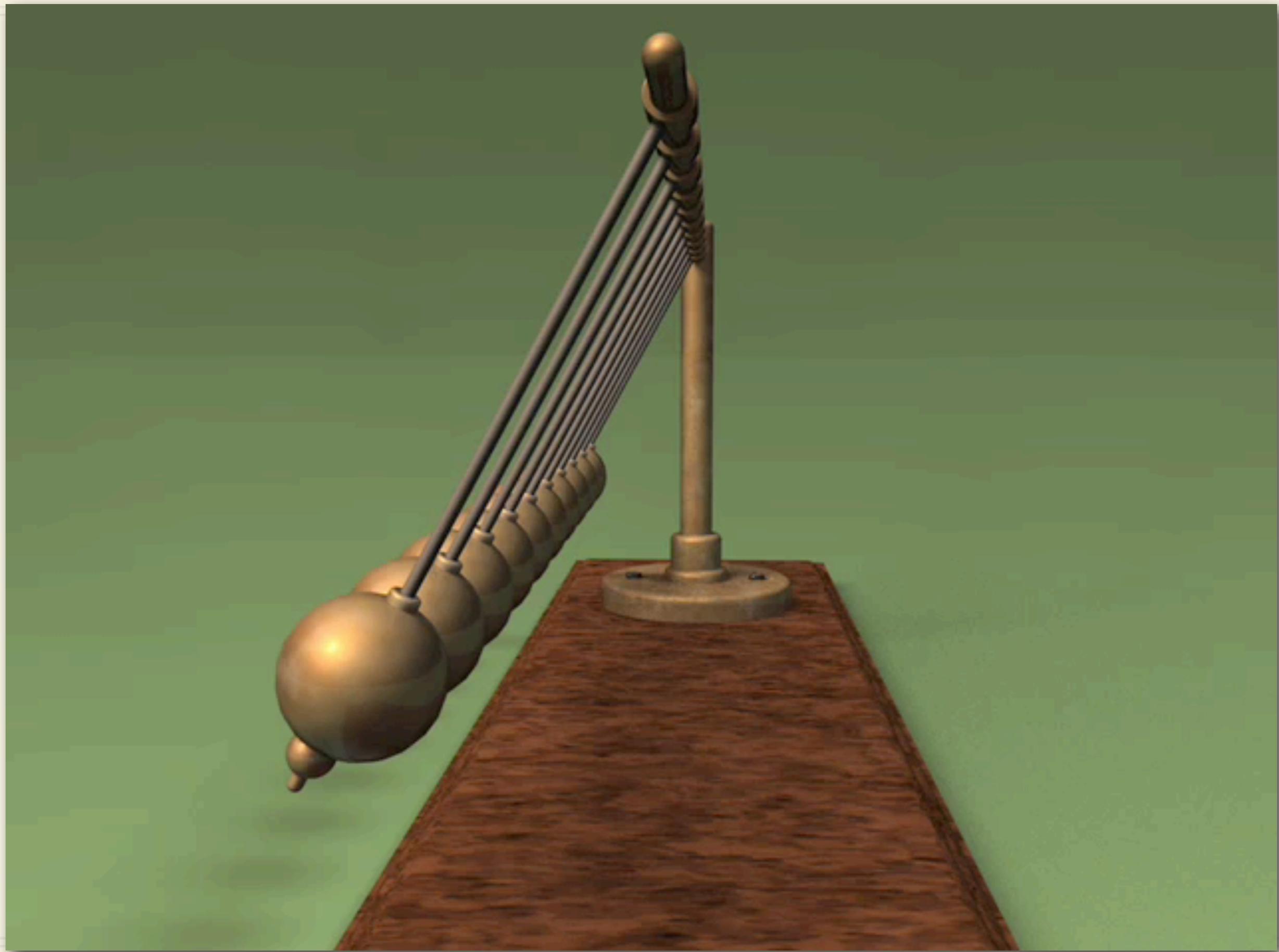


39

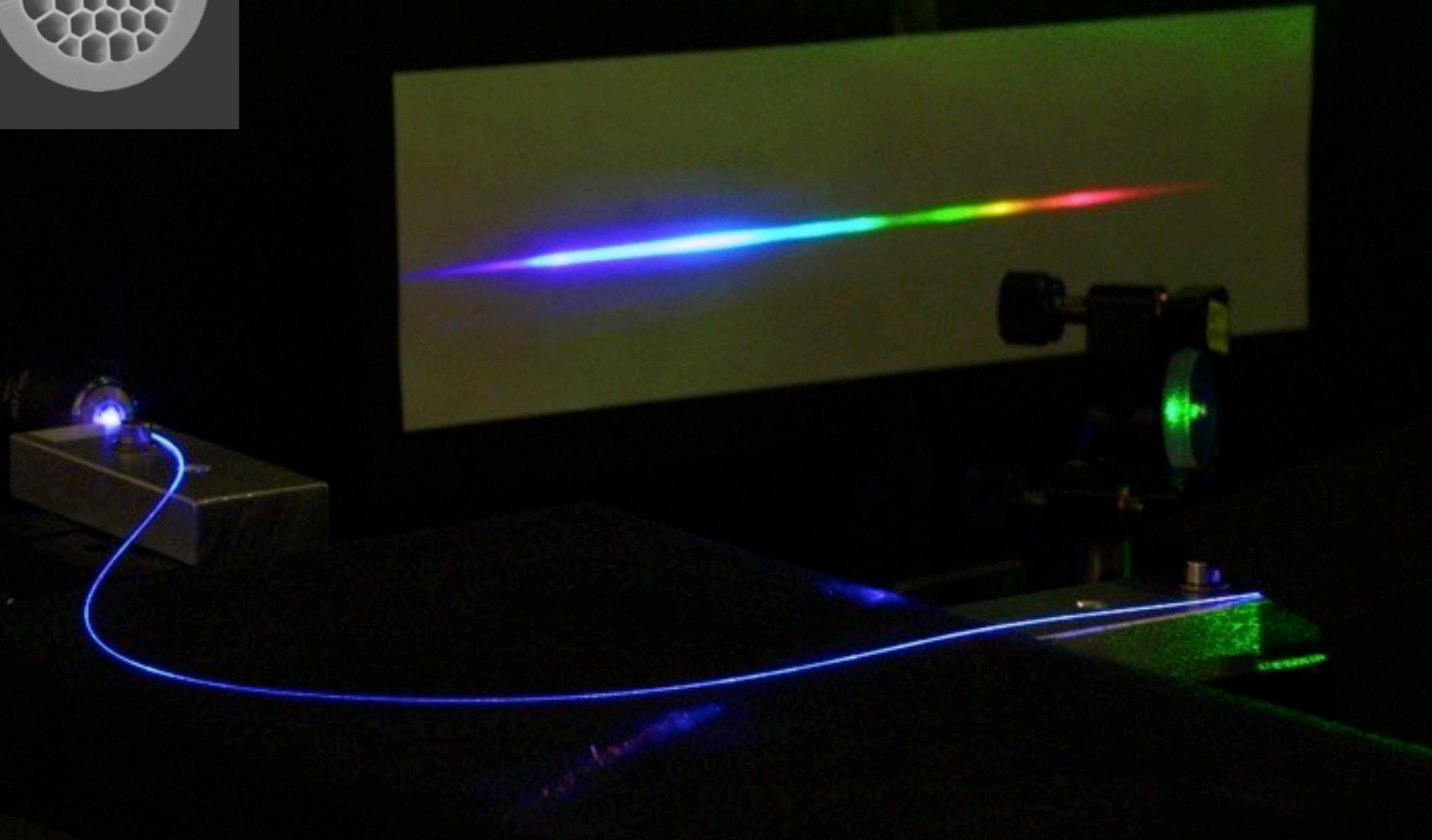
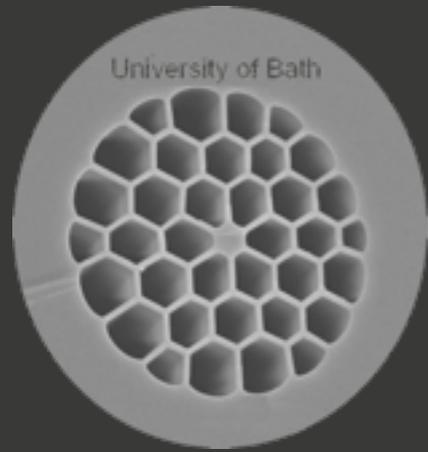
32

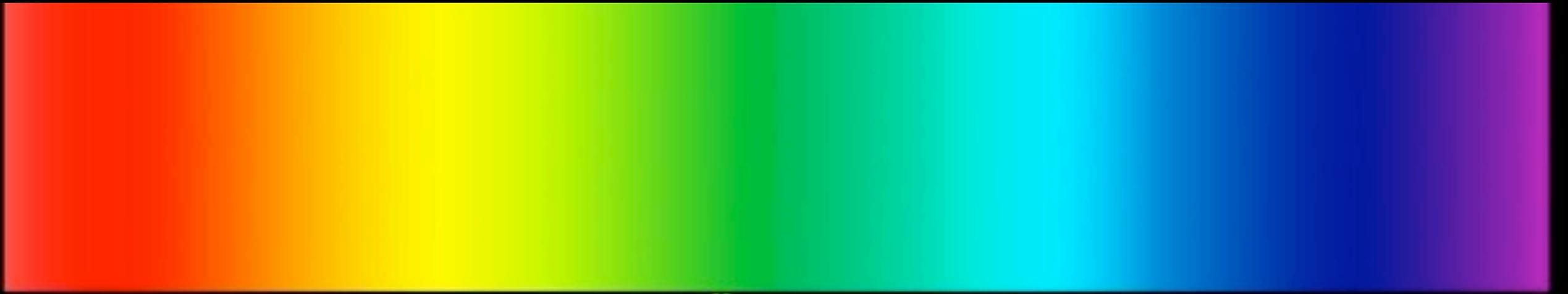
31

30 Schwingungen / Minute

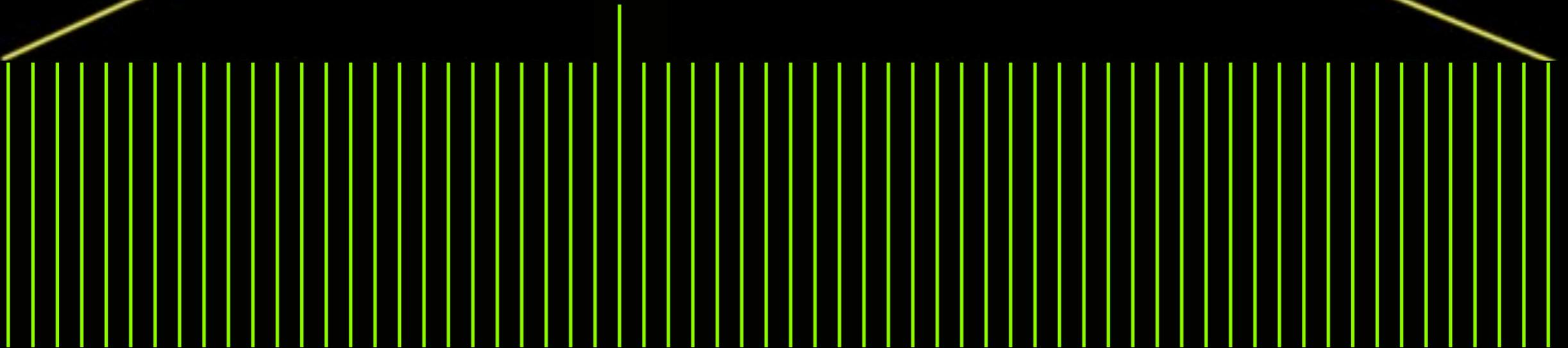


Optischer Frequenzkamm-Generator





$$f_m = m f_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}}$$



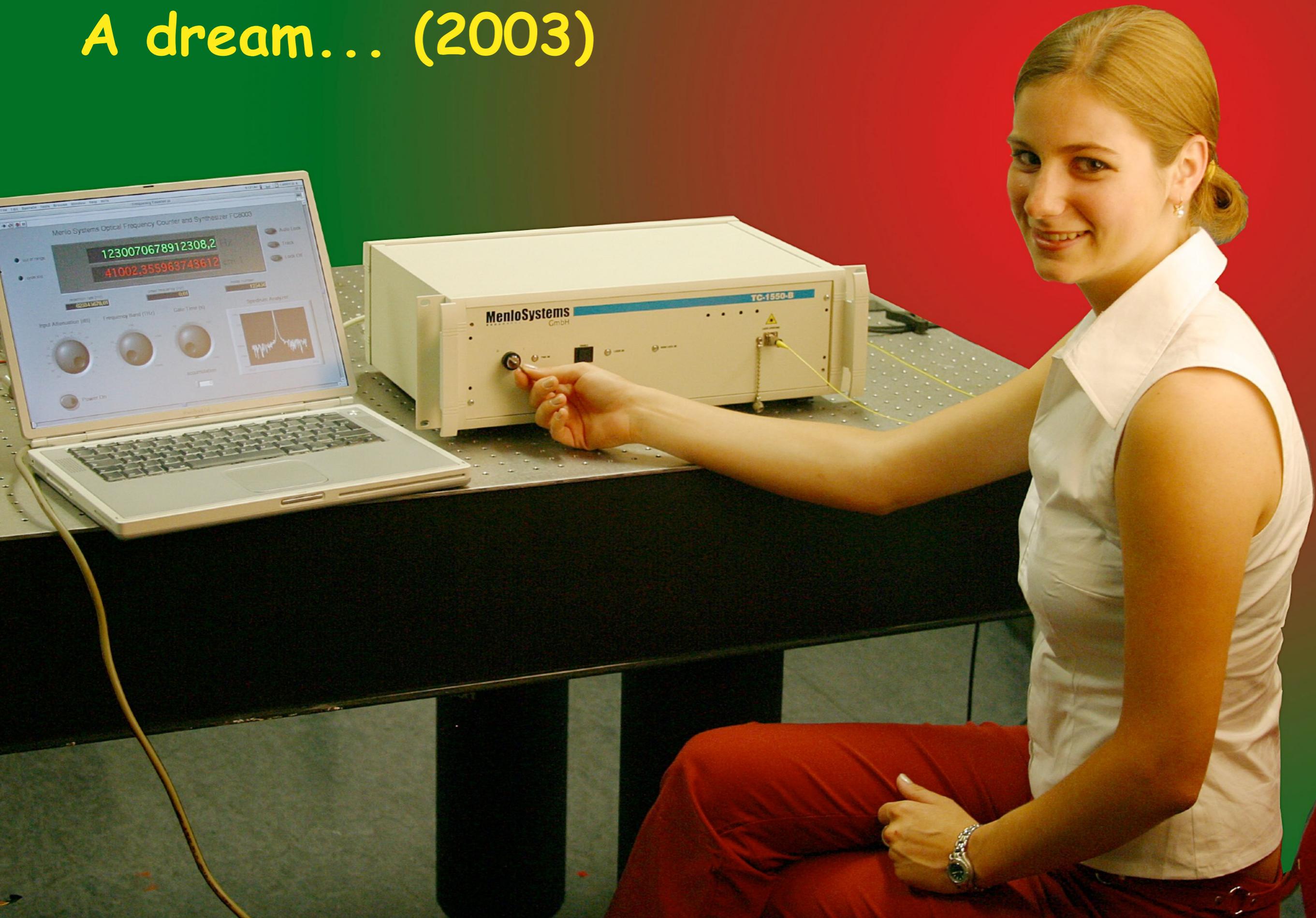
Übergabe eines Frequenzkamm-Generators an das Deutsche Museum (München, 18. Juni 2008)



Erbium dotierter Faserlaser Frequenzkamm



A dream... (2003)



Application Note
DESCRIPTION
PARAMETER

MenloSystems
Use these cables to connect the SmartComb to a computer.

MenloSystems

SMARTCOMB
Compact Frequency Comb

Laser frequency **192'113'020'001'153 Hz**

RF signal level:

System status

Auto Control

Rep.-rate: 100'000'000.001 Hz
CEO beat: 10'000'000.001 Hz
CW beat: 10'000'000.004 Hz

Settings



Esc



USB



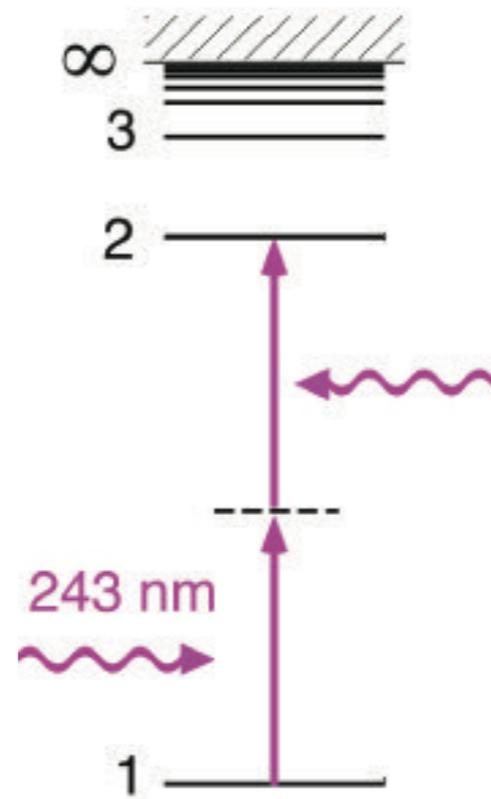
On



Power



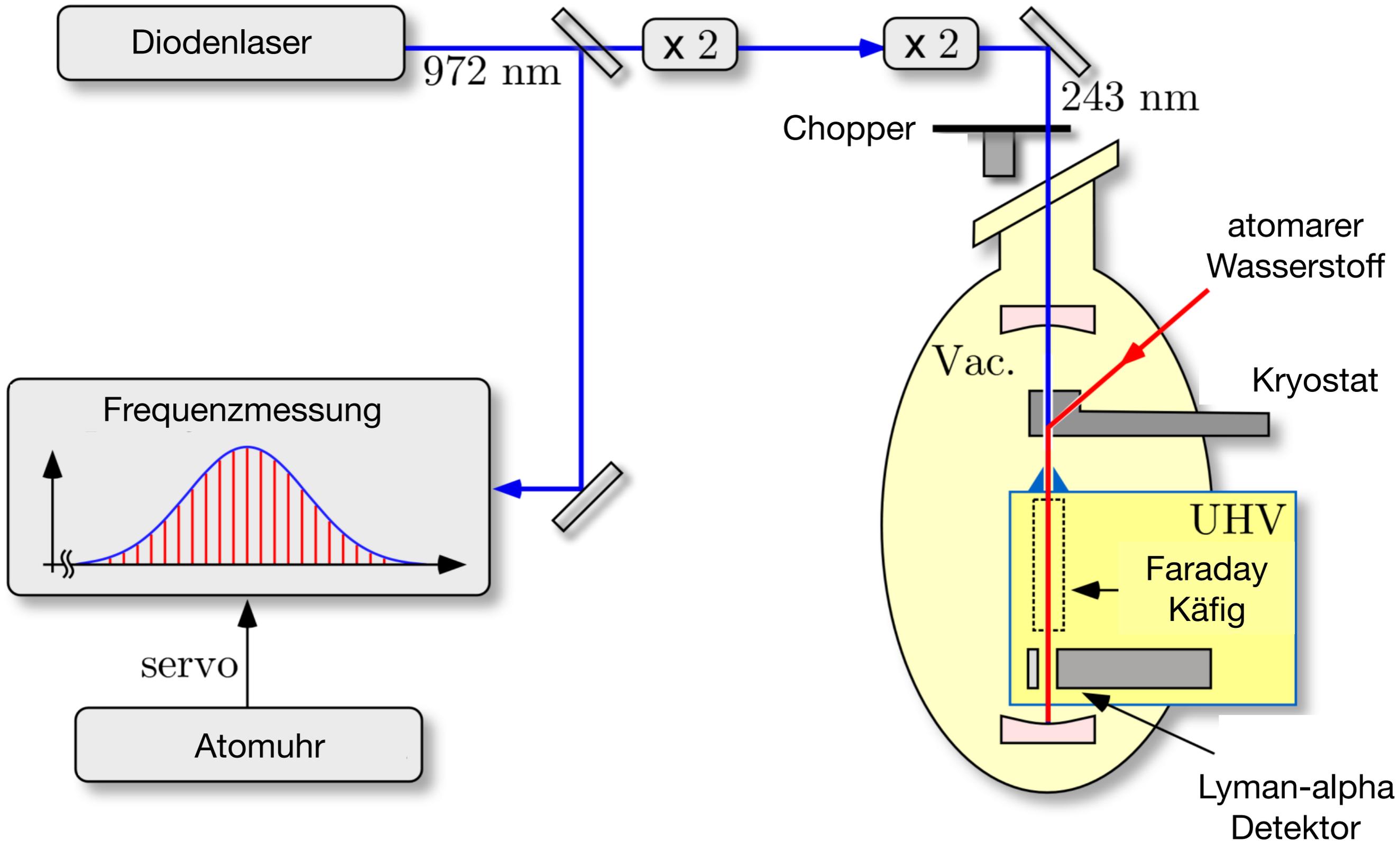
Wasserstoff 1S - 2S Zweiphotonenübergang



(Natürliche Linienbreite: 1,3 Hz)

T.W.H, S.A. Lee, R. Wallenstein, and C. Wieman, PRL. 34, 307 (1975), ...

Wasserstoff 1S - 2S Spektrometer



Wasserstoff 1S-2S Frequenz

(hyperfein Zentroid)

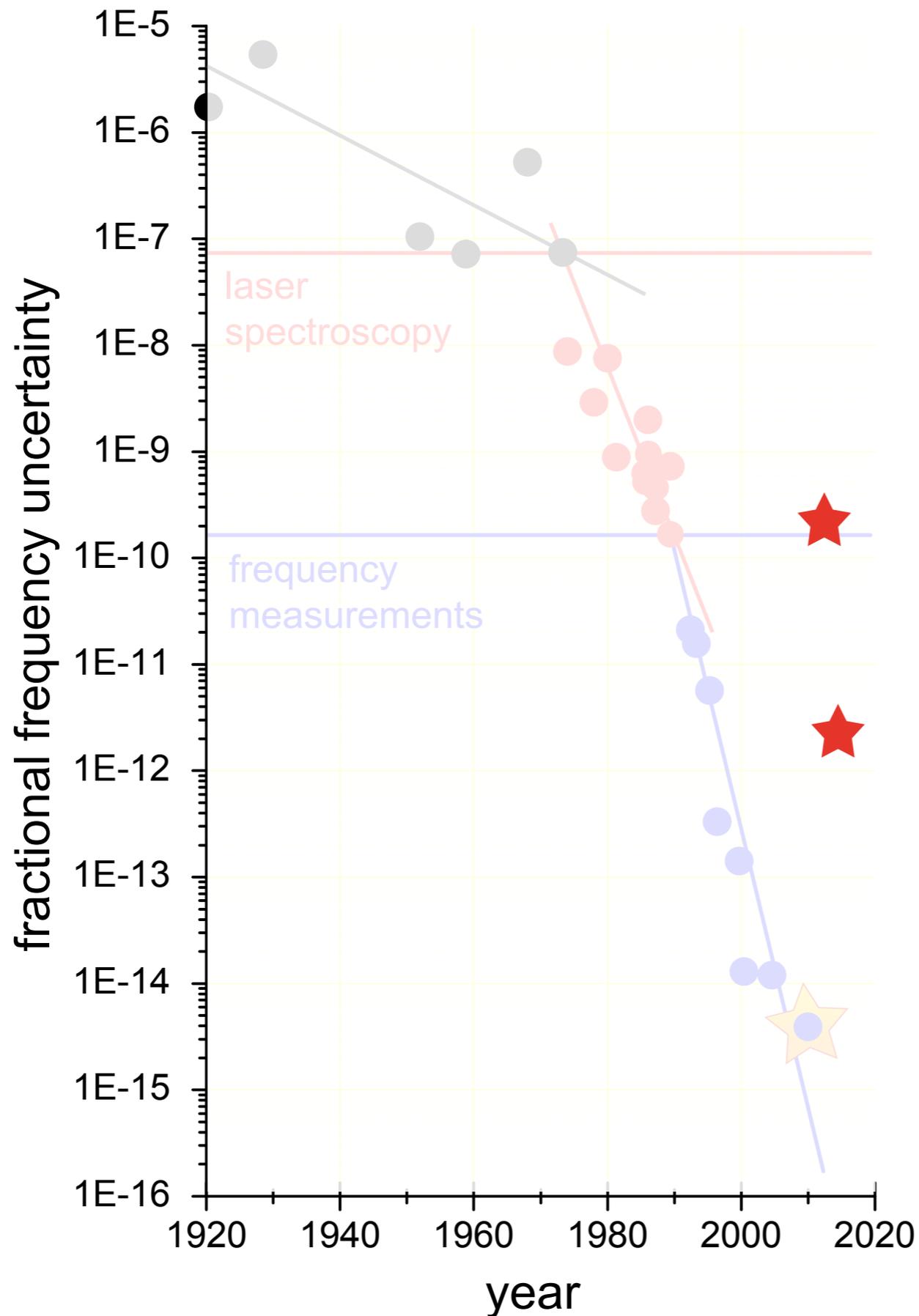
2 466 061 413 187 035 \pm 10 Hz

relative Unsicherheit: 4.2×10^{-15}

C. Parthey, et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 203001 (2011)

A. Matveev, et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 230801 (2013)

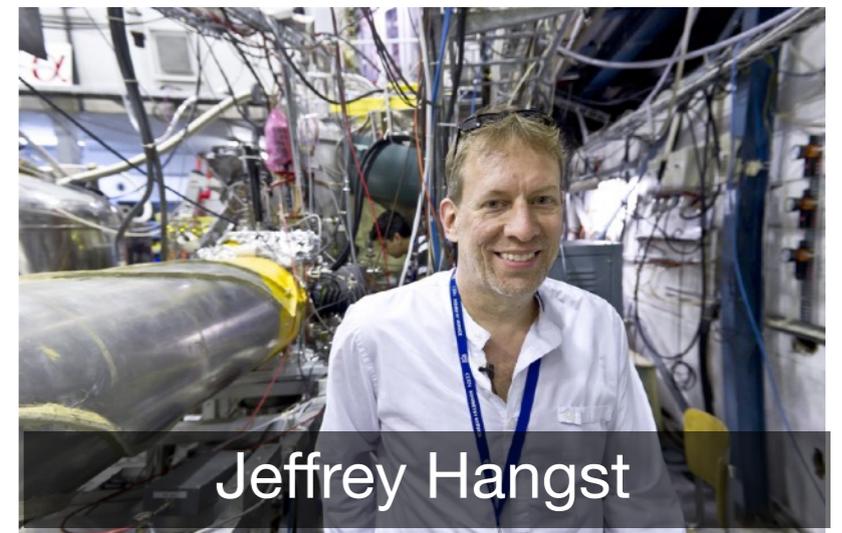
Optische Spektroskopie von Antiwasserstoff



ALPHA α

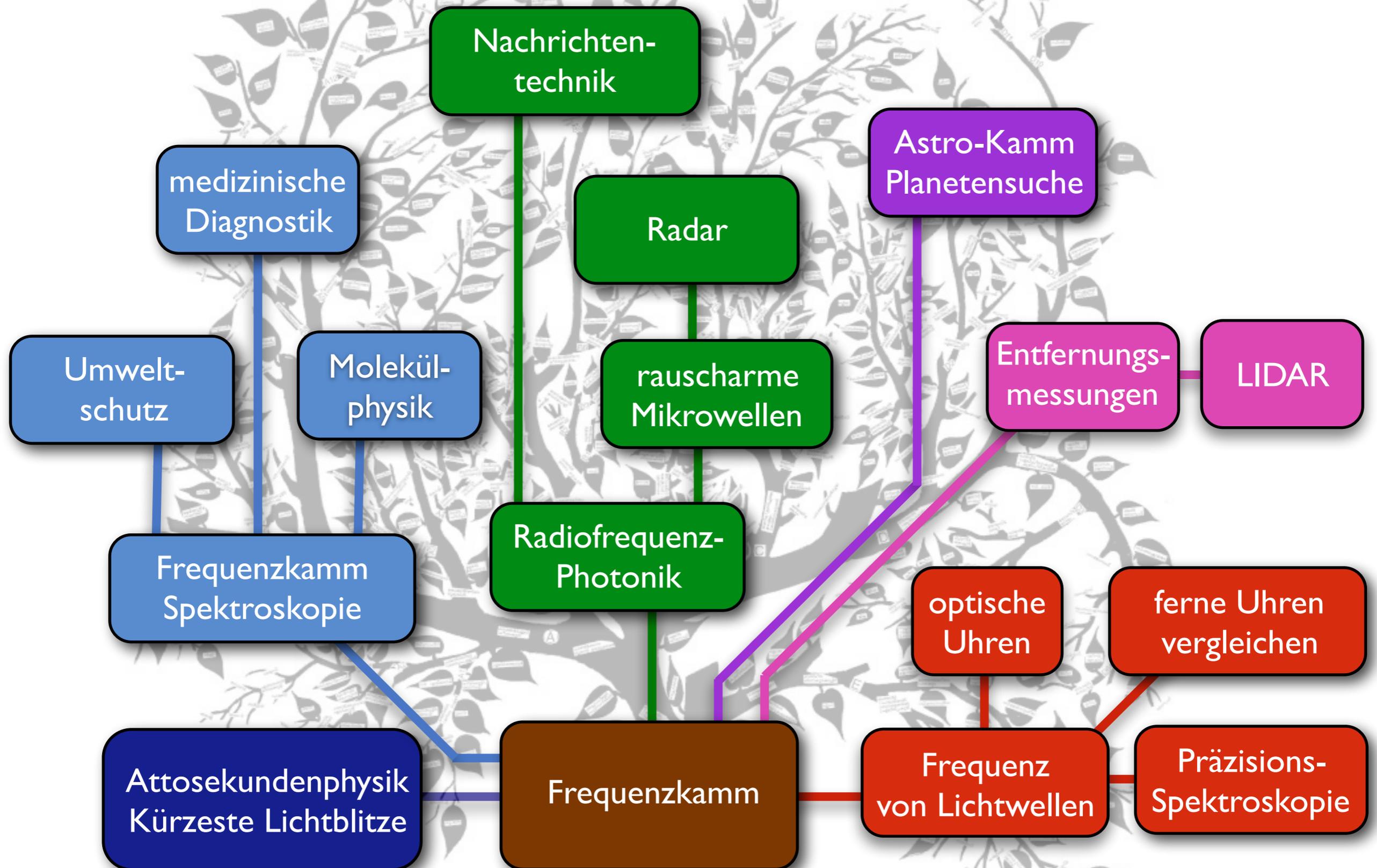
M. Ahmadi et al.,
Nature **541**, 506 (2017)

M. Ahmadi et al.,
Nature **557**, 71 (2018)



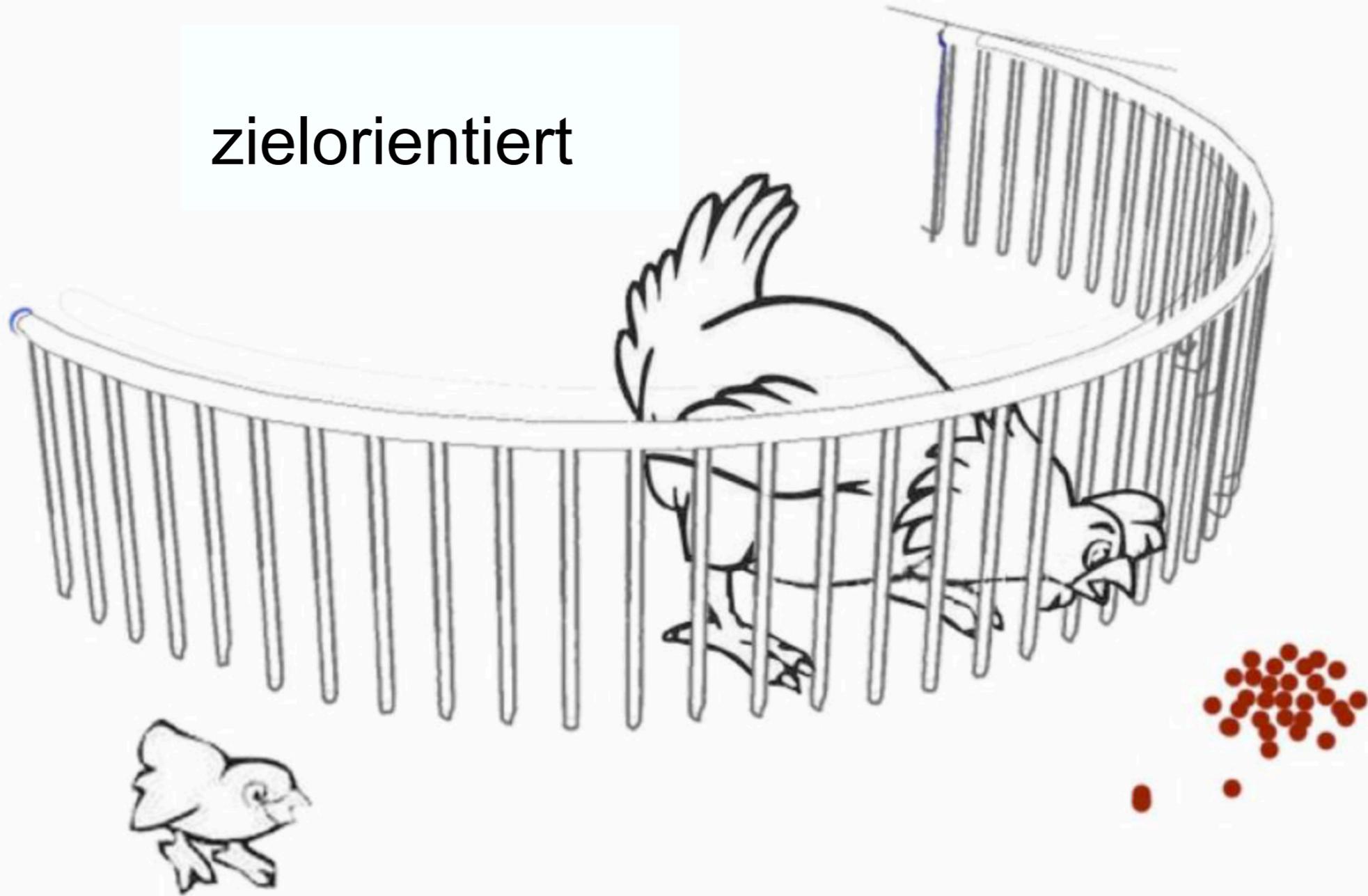
Jeffrey Hangst

Evolution der Anwendungen des Frequenzkammes



Forschen aus Neugier

zielorientiert



neugierig

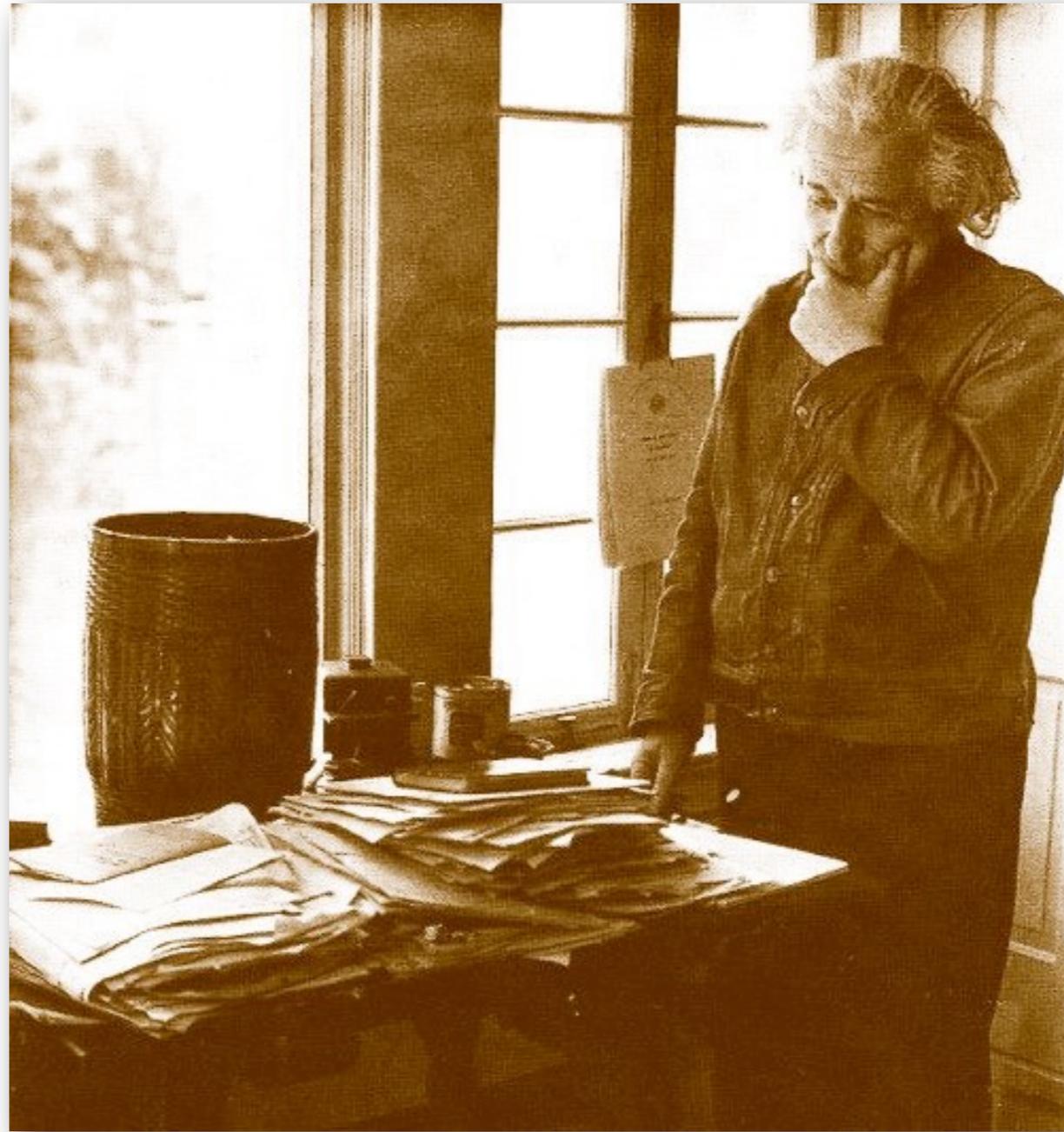


Danke!



Was ist Zeit?

Frequenzkamm und optische Atomuhren

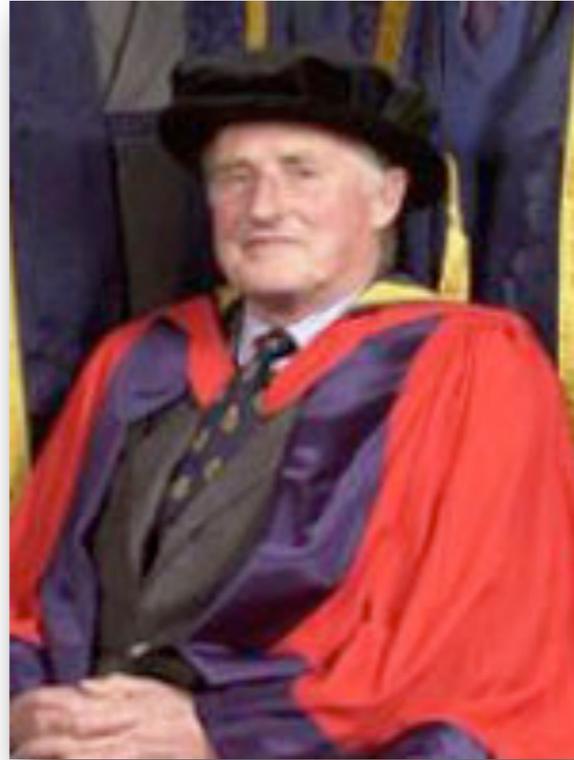


Was ist Zeit?
Was ist Raum?



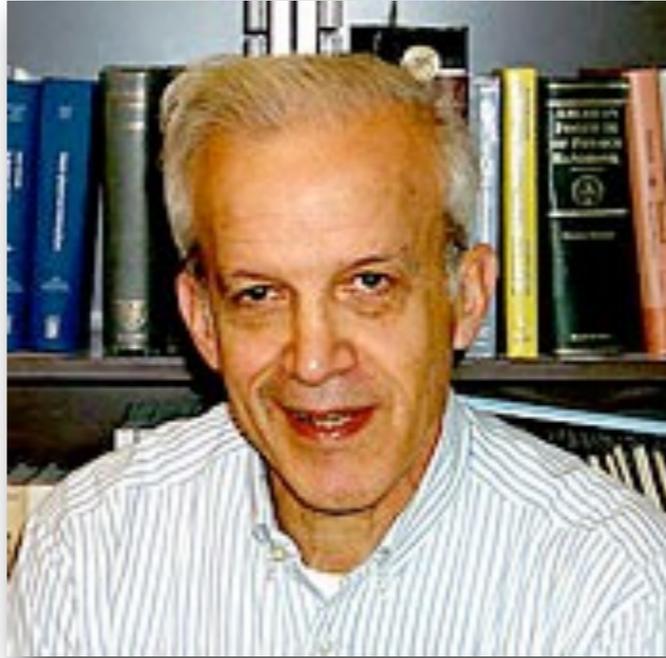
Könnte man die Zeit anhalten,
für wie lange „stunden“ dann die Zeit?

Immanuel Kant (1724-1804)



Zeit ist was verhindert,
dass alles auf einmal passiert.

John Wheeler (*1911)



Zeit ist was man mit einer Uhr misst

Daniel Kleppner





Raum muss man mit einer Uhr messen

John L. Hall

1983, Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM):

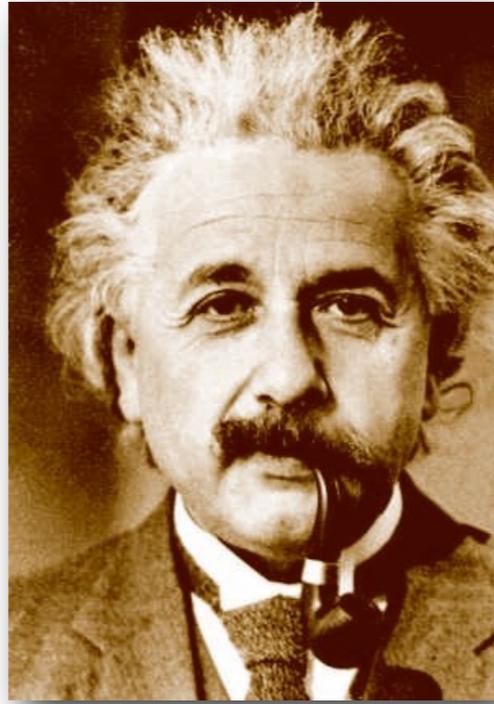
Ein Meter ist die Strecke, die Licht
in $1/299\,792\,456$ Sekunde zurücklegt



Energie sollte man mit einer Uhr messen

Max Planck

$$E = h\nu$$



Masse sollte man mit einer Uhr messen

Albert Einstein

$$E = mc^2 = h\nu$$

Evolution der Uhr

seit 3500 AD



Sonnenuhr
ein Zyklus pro Tag

1656



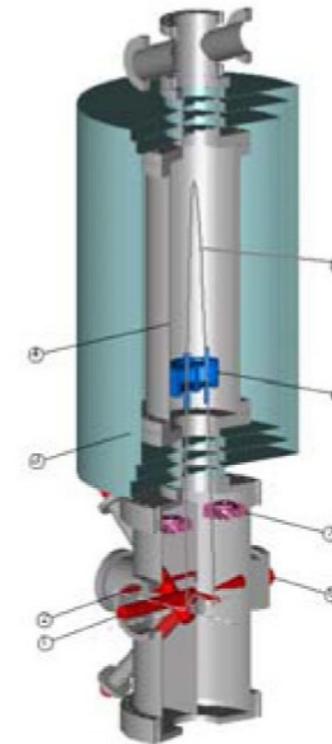
Pendeluhr
1 Hz

1918



Quarzuhr
32 768 Hz

1955



Cäsium Atomuhr
9 192 631 770 Hz

Optische „Pendel“

Lasergekühlte gefangene Ionen

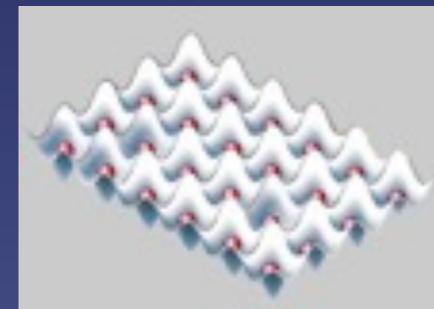
Hg^+ , In^+ , Yb^+ , Sr^+ , Ca^+ , Al^+ ...



Paulfalle

Kalte Neutralatome

H, Ca, Sr, Yb, Ag, ...

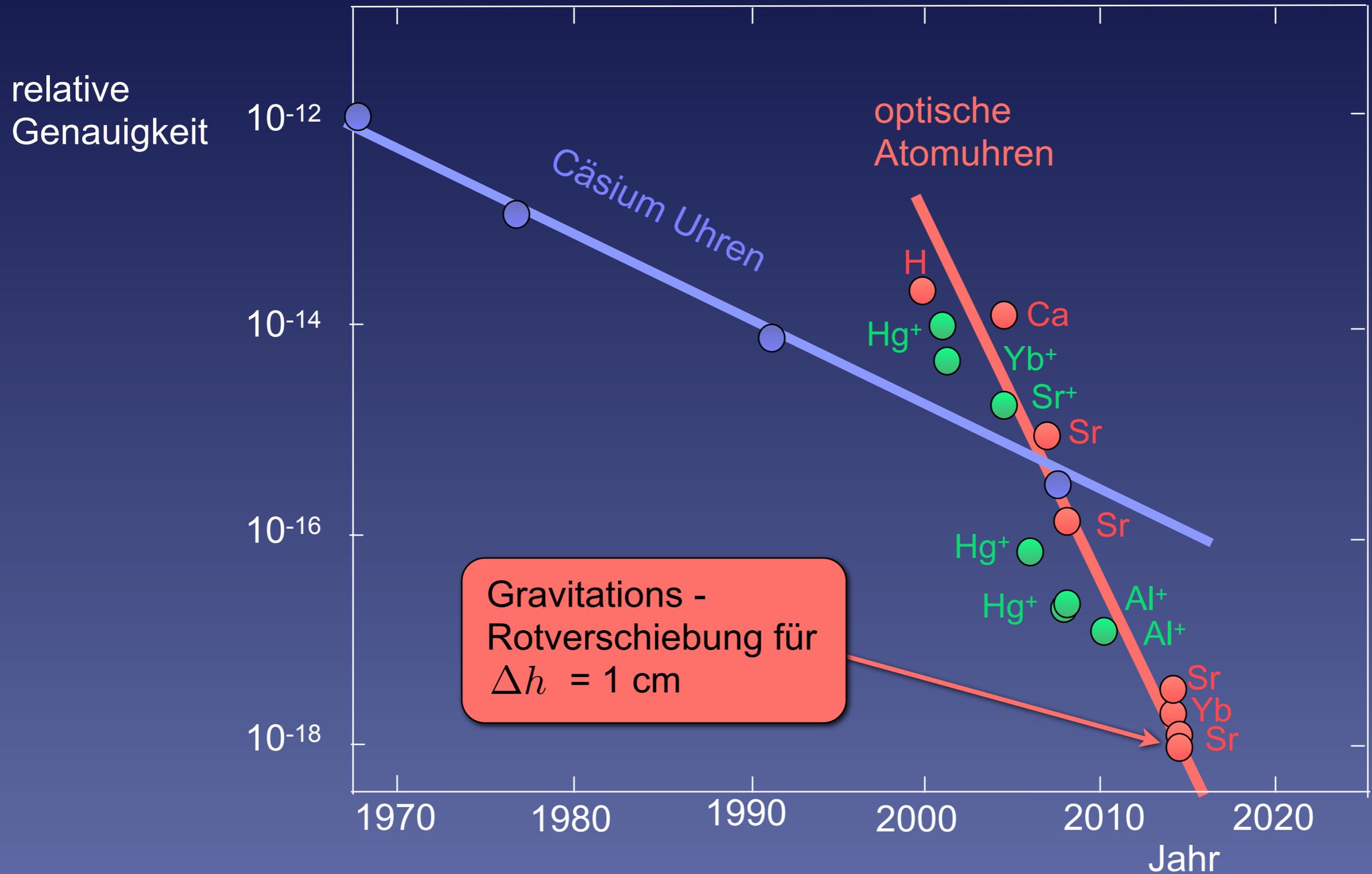


Optisches Gitter

Moleküle:

I_2 , C_2H_4 , ...

Genauigkeit von Atomuhren



Frequenzkamm und optische Atomuhren im Weltraum

Referenzuhren

Satellitennavigation

Navigation im Weltraum

Relativistische Geodäsie

Astronomische “Very Long Baseline Interferometry”

Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie

Test des Äquivalenzprinzips

Detektion von Gravitationswellen

Suche nach Veränderungen von Naturkonstanten



Danke!

