

Atome & Kerne

Sommersemester 2019

Vorlesung # 17, 25.06.19

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

Atome & Strahlungsprozesse

- Laser: Prinzip & Grundlagen

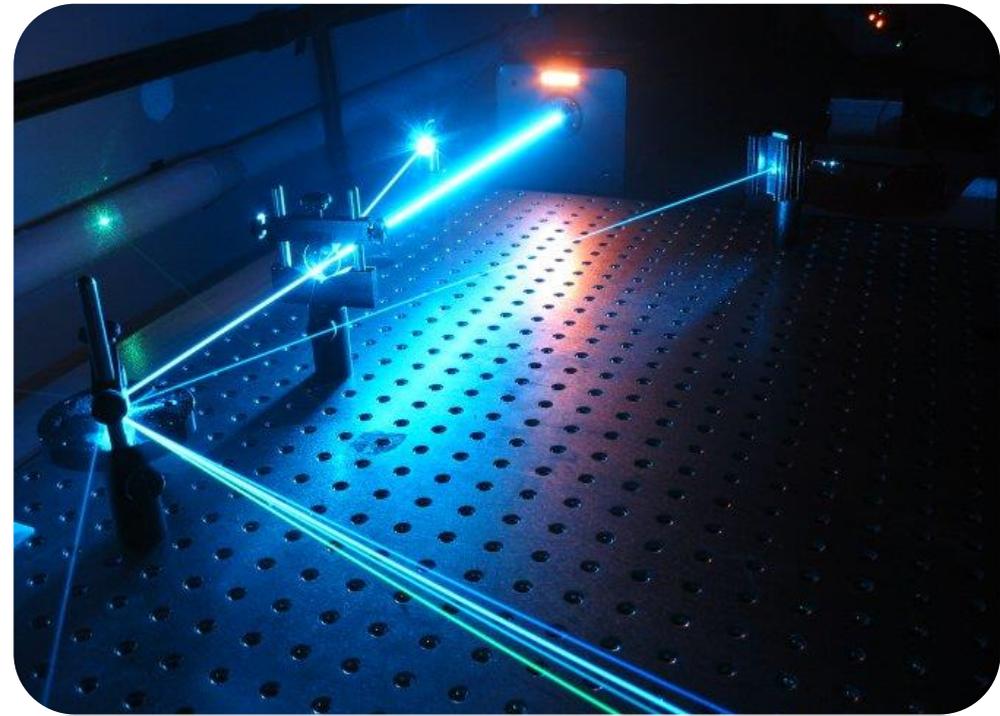
Rubin-Laser

He-Ne-Laser

Anwendungen: Gravitationswellen

Atome

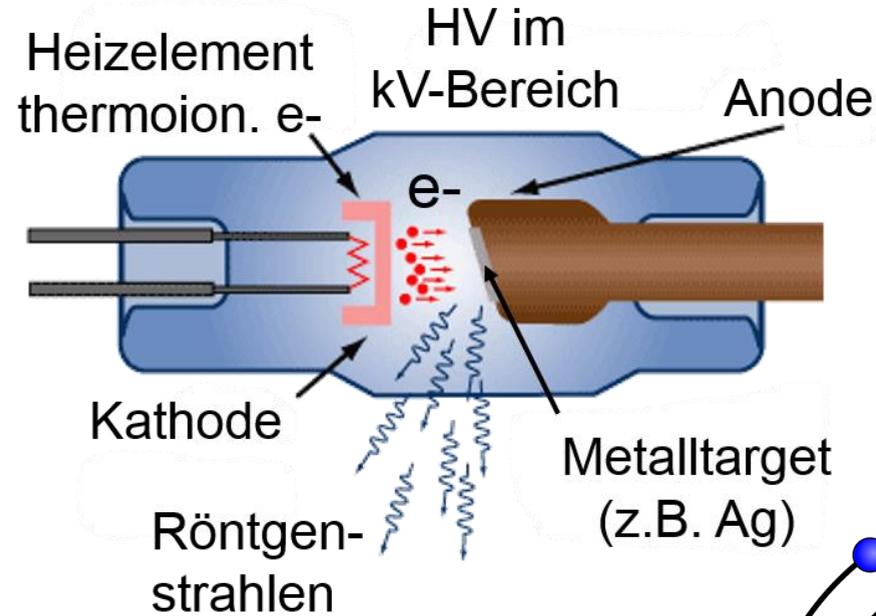
- wichtige Aspekte, Frequenzmessung



Röntgenstrahlung - Grundlagen



- X-Rays:**
Energien im multi-keV-Bereich

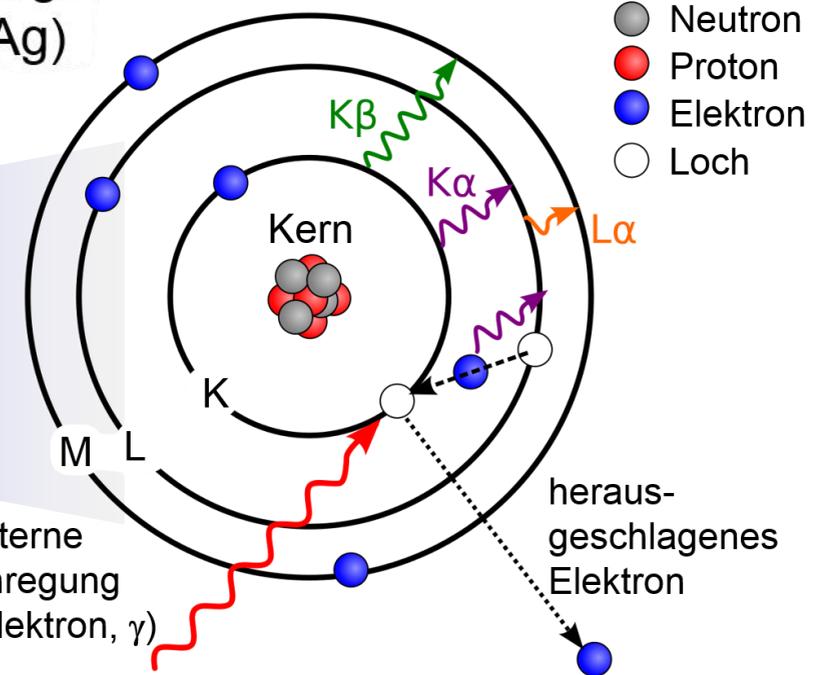
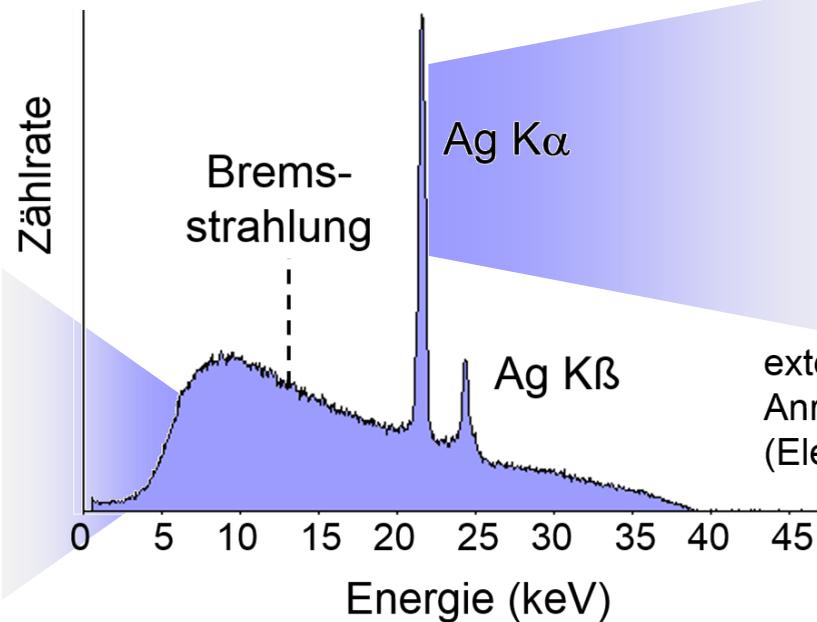


Charakteristische Strahlung

Bremsstrahlung (e^- , γ)

Röntgenphotonen λ, ν

$$I(\nu) \sim Z \cdot (\nu_{\max} - \nu)$$

$$\nu_{\max} = e \cdot U_0$$


Röntgenstrahlung – Transmission

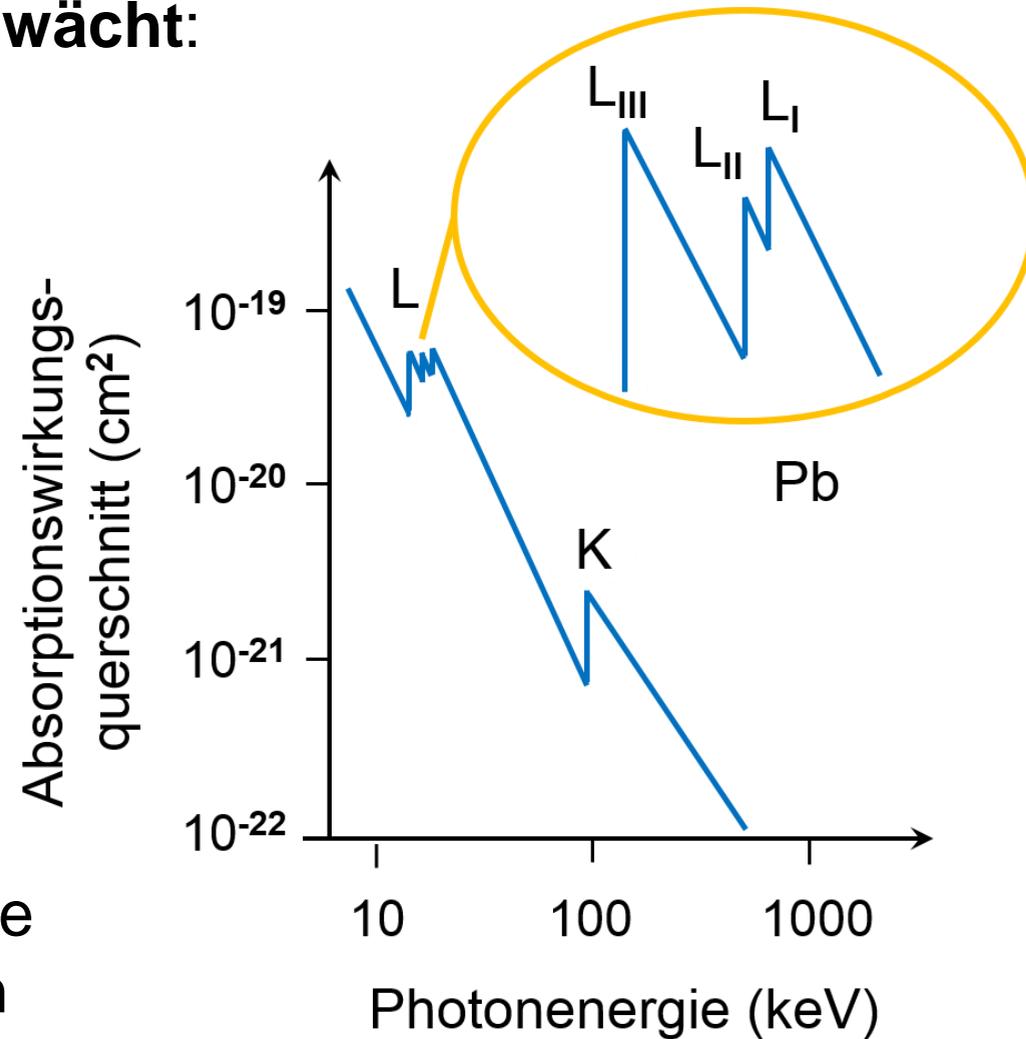
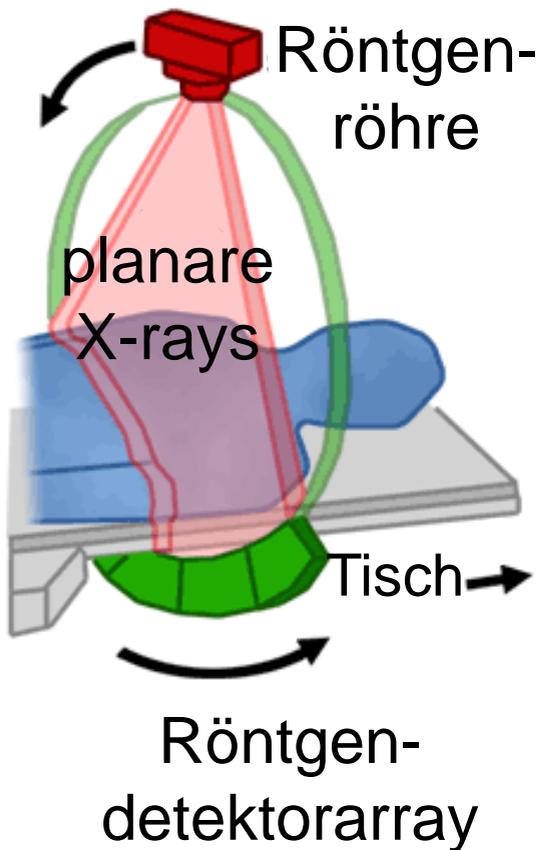


- Beim Durchtritt durch Materie wird **Röntgenstrahlung** durch Photo-Absorption **exponentiell abgeschwächt**:

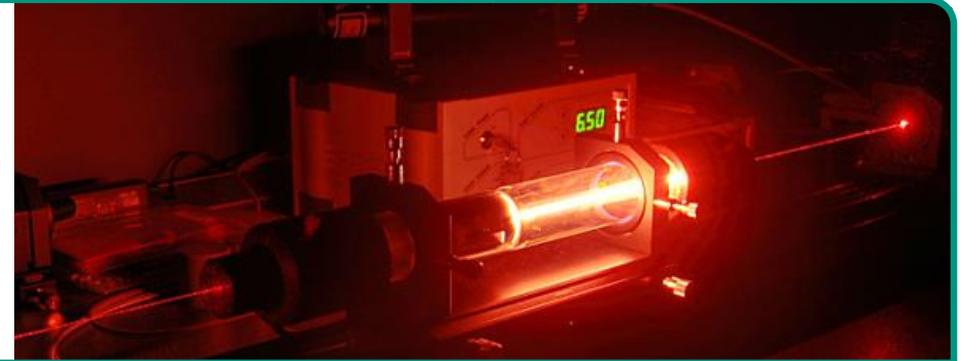
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

μ : Massen-Absorptions-Koeffizient

- element-spezifische Absorptionskanten (K,L,... Kanten)



LASER = *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung



■ Eigenschaften von Laserlicht

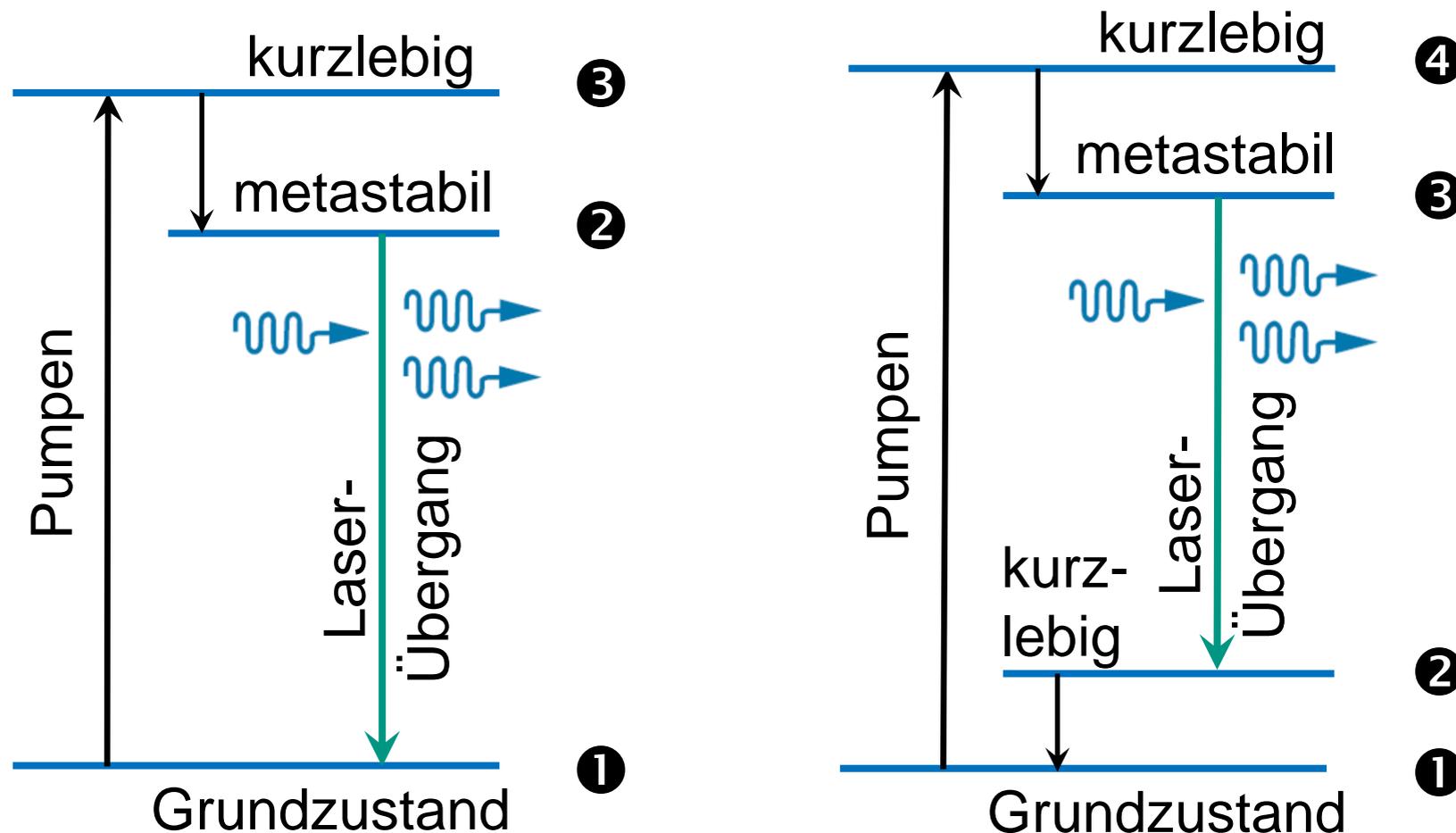
- **kohärente Emission** (große Kohärenzlänge)
- **monochromatisch** (extrem enger Frequenzbereich)
- verfügbare Wellenlängen:
Mikrowellen (Maser), IR, optisch, UV, Röntgen
- kontinuierlicher Dauerbetrieb (cw) bis hin zu extrem kurzen Strahlpulsen (femto-s, atto-s)
- hohe Wiederholfrequenz
- hohe Phasenstabilität



Laser – Grundprinzip

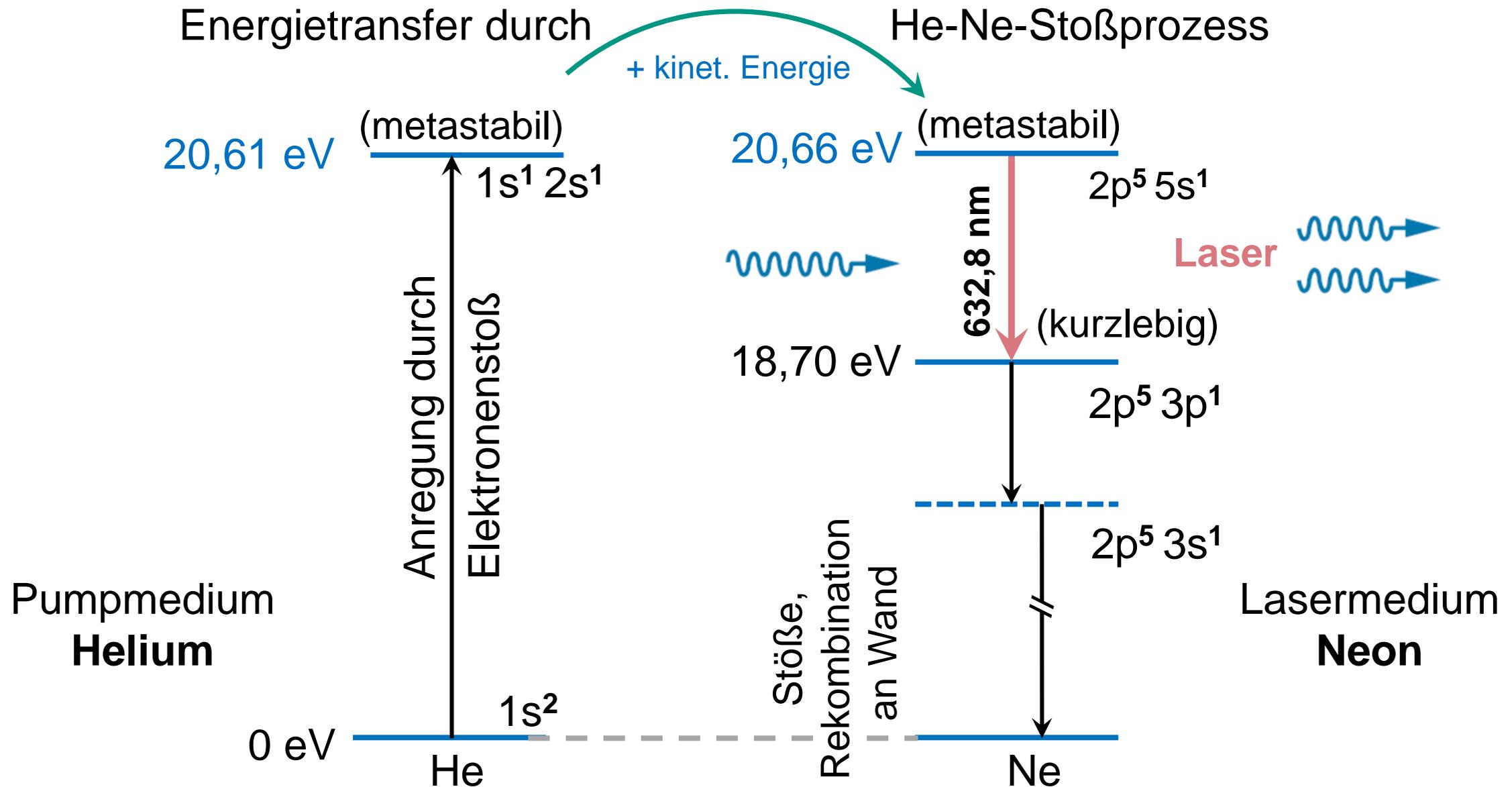
■ Grundlagen des Lasers: 3-Level oder 4-Level-Lasersystem

- Erzeugung einer **Besetzungsinversion** durch Anregen eines metastabilen Niveaus durch Pumpen (optisch, elektrisch)
- **stimulierte Emission** zu kurzlebigen Niveau erzeugt Laserstrahl



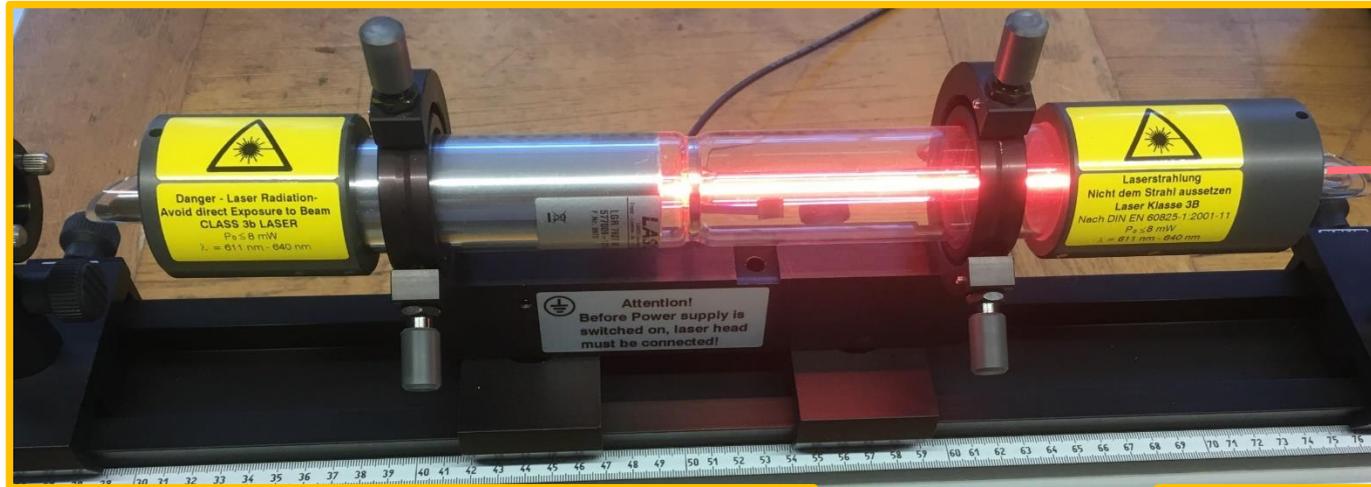
Helium-Neon-Laser – Schema

■ Termschema eines He-Ne-Lasers:



Helium-Neon-Laser – Experiment

■ Aufbau eines He-Ne-Lasers – Beispiel eines cw-Gaslasers



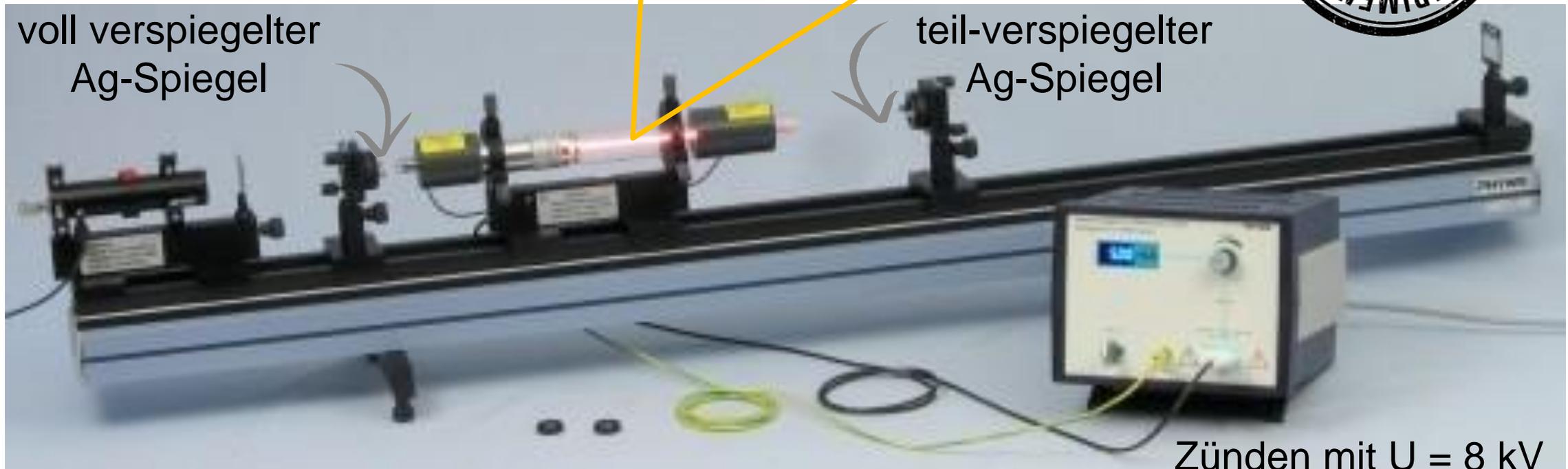
632,8 nm

Leistung < 8 mW



voll verspiegelter
Ag-Spiegel

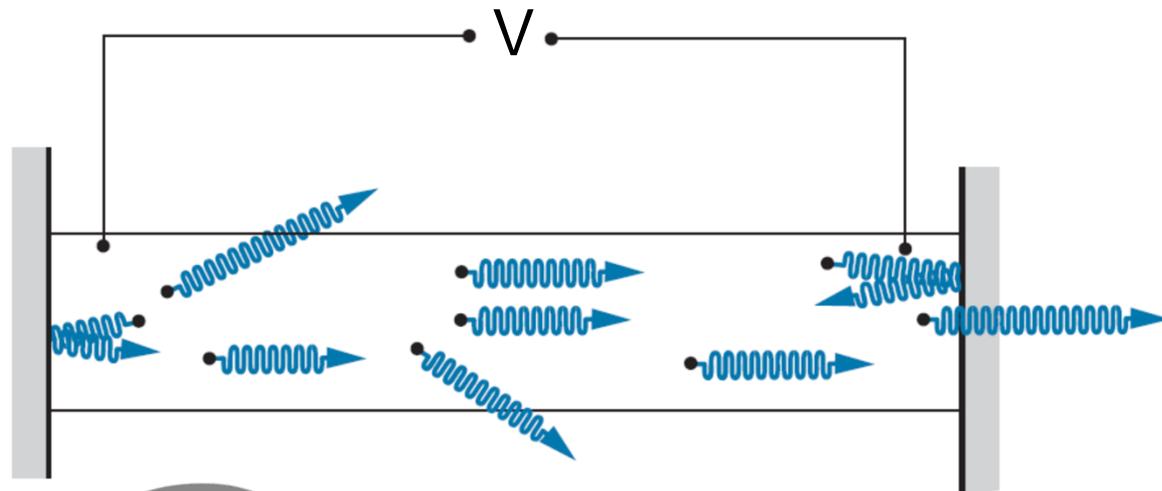
teil-verspiegelter
Ag-Spiegel



Zünden mit $U = 8 \text{ kV}$
bei $I = 5 \text{ mA}$

Helium-Neon-Laser – Experiment

■ Aufbau eines He-Ne-Lasers



- Pumpen durch Elektronstöße zur Anregung metastabiler He-Niveaus
- stehende Welle zwischen den beiden Spiegeln, Photonen auf Achse erzeugen eine Vielzahl **stimulierter Emissionsprozesse**

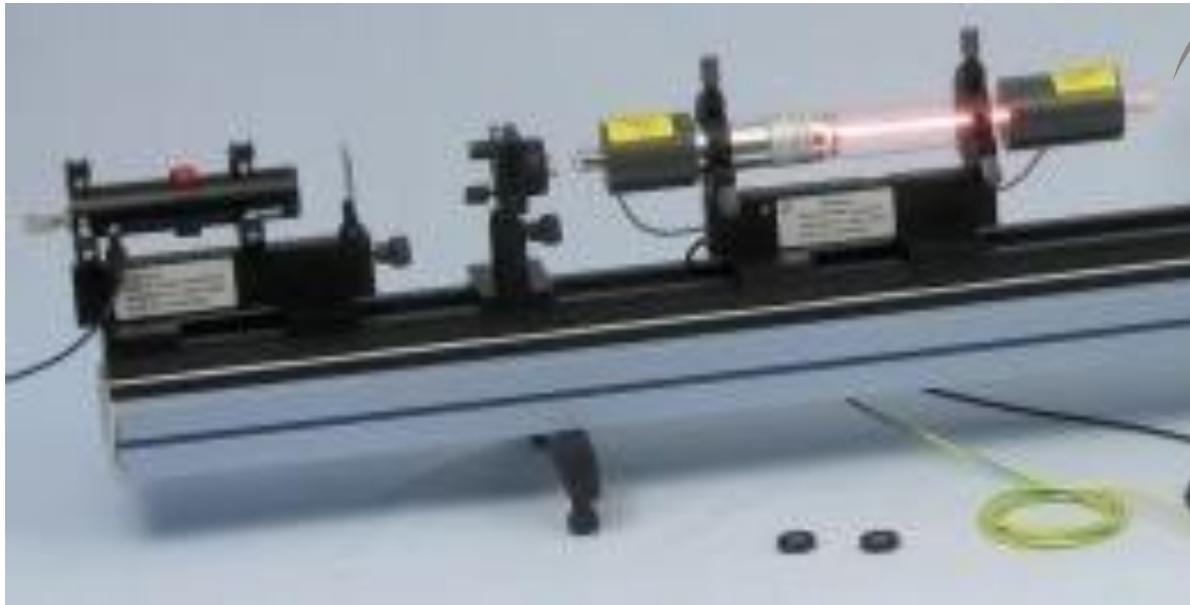
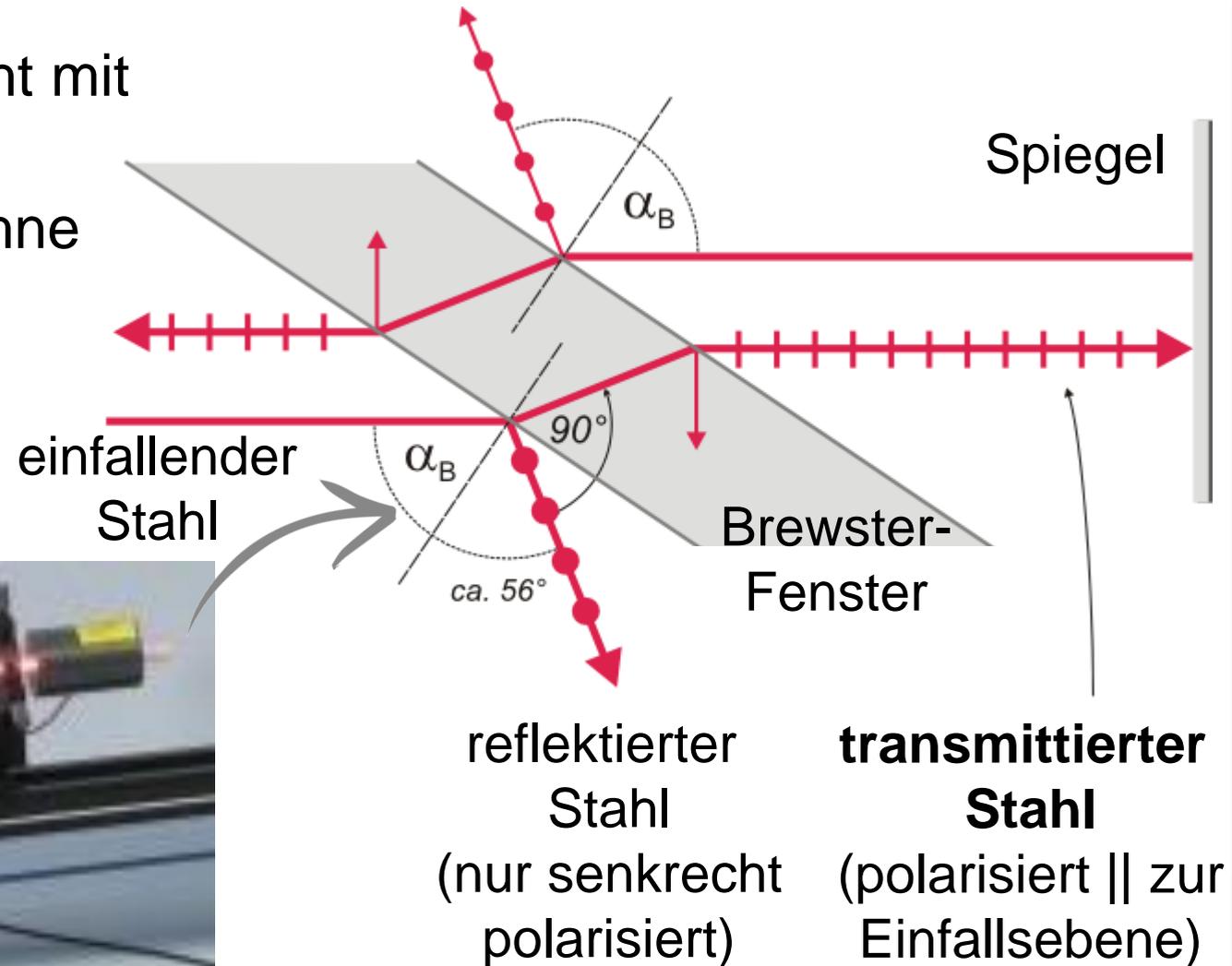


- **cw** (kontinuierlicher) Betrieb
- ohne Brewster-Fenster keine präferierte Polarisationssebene

Helium-Neon-Laser – Experiment

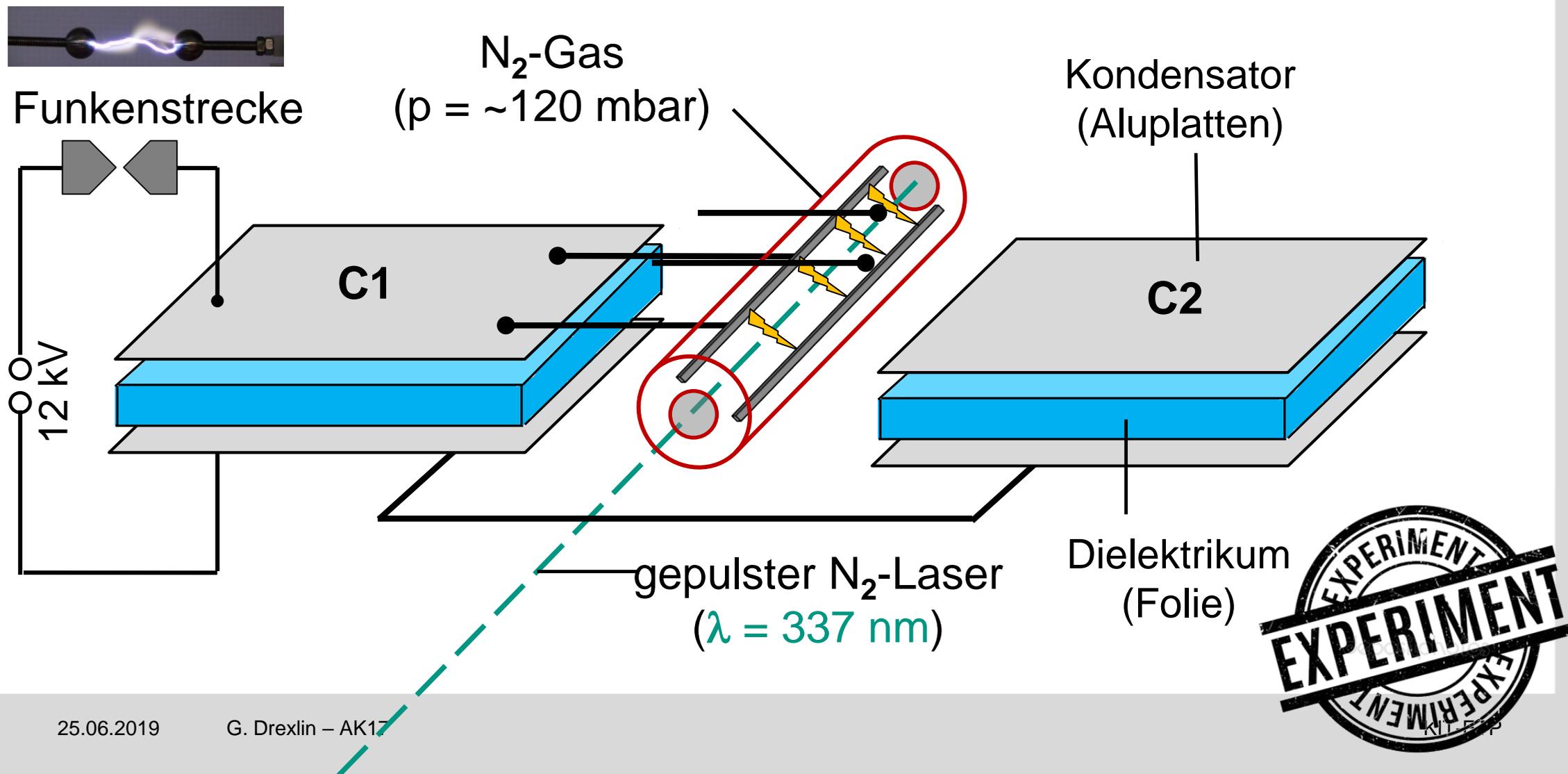
■ Aufbau eines He-Ne-Lasers – Brewster-Fenster

- **Brewster-Fenster:** Laserlicht mit Polarisation \parallel zur Einfalls-Richtung passiert Fenster ohne Verluste, legt damit die Polarisationsrichtung des Lasers fest



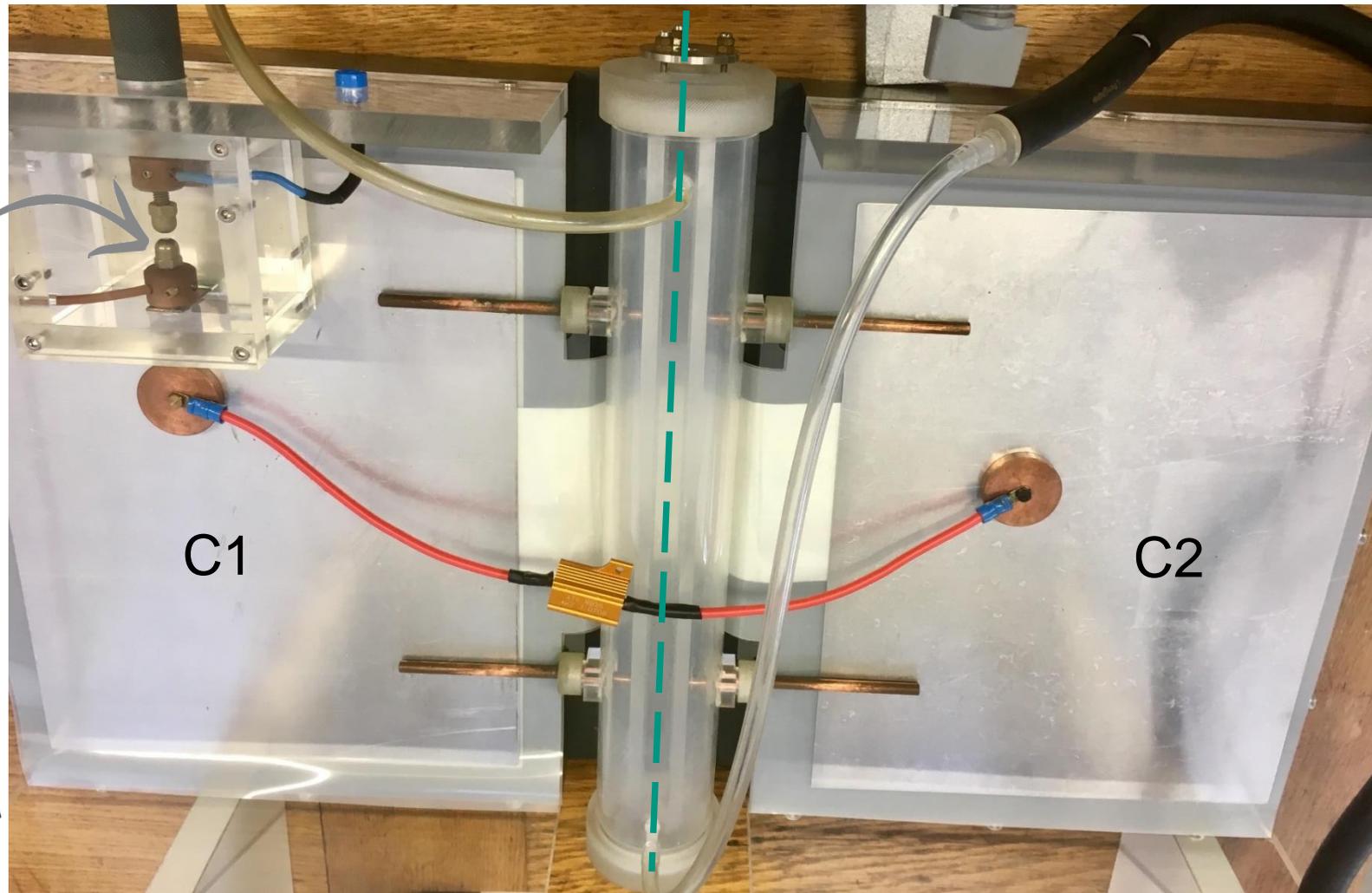
Stickstoff-Laser – Experiment

- **Einfacher Laseraufbau:** zwei Aluminiumplatten (jeweils mit dielektrischer Folie hoher Spannungsfestigkeit) werden aufgeladen, eine davon (hier C1) wird über ein Funkenstrecke sehr schnell entladen.



Stickstoff-Laser – Experiment

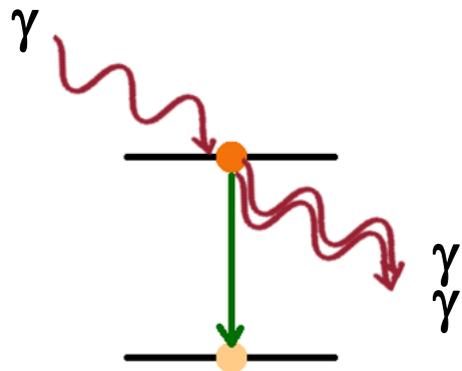
Einfacher Laseraufbau: Entladungen im N₂-Rohr regen N₂-Moleküle an, beim Abregen wird ein gepulster Laserprozess initiiert, nach Wiederaufladen des leeren Kondensators erneute Zündung einer Gasentladung



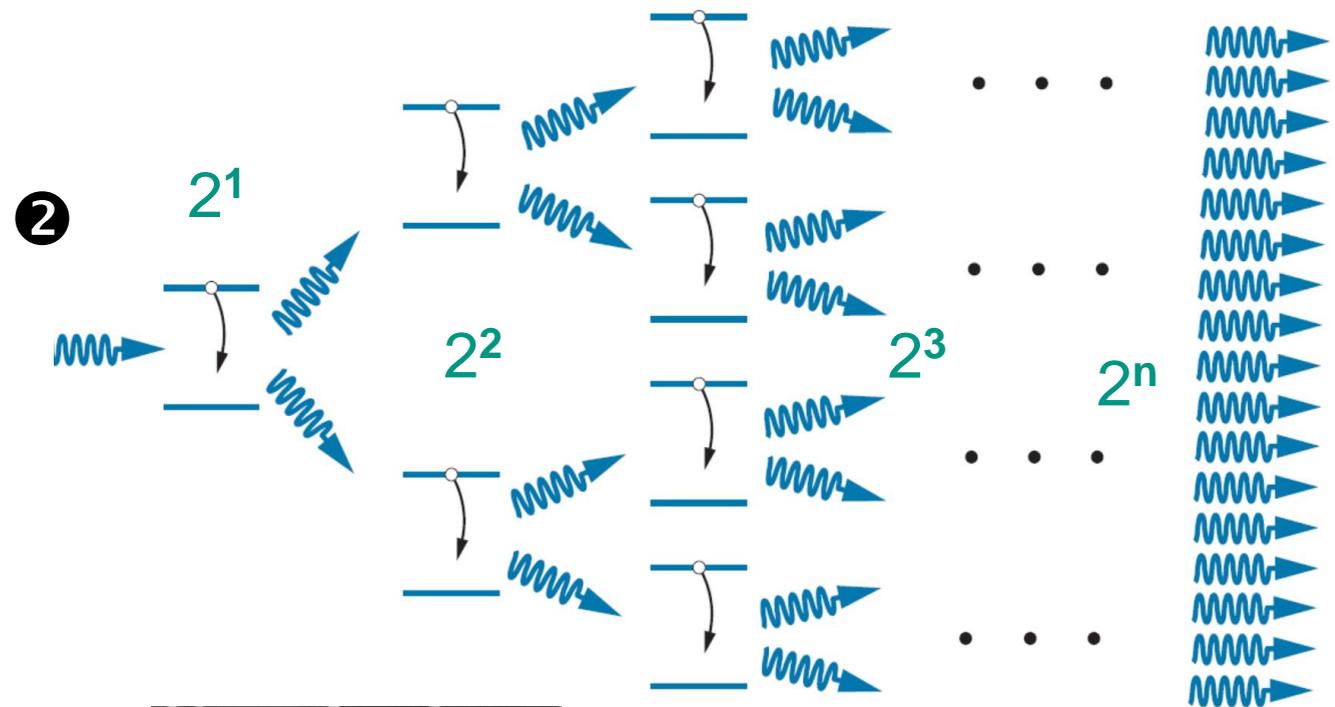
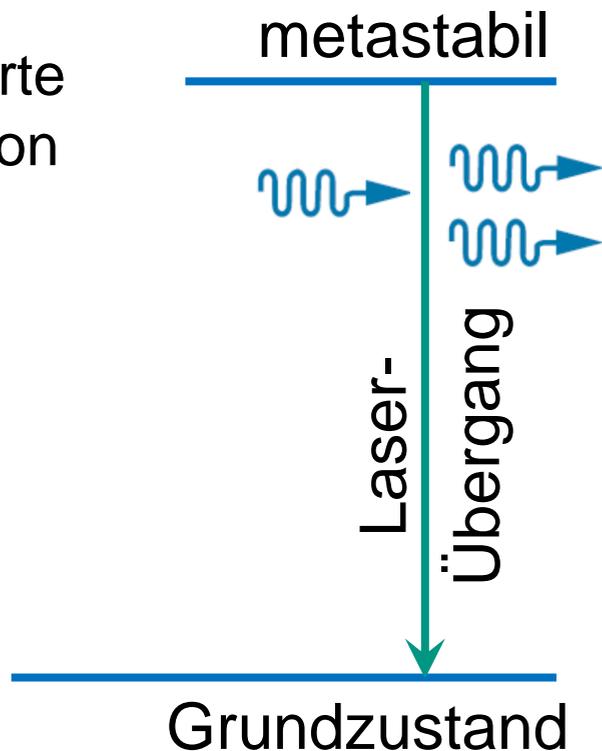
Laser – stimulierte Emission

- **stimulierte Emission** führt zur Abregung des metastabiles Niveaus (s. Kap. 3.1.1 Temperaturstrahlung – Schwarzkörperstrahlung)

Niveau-Übergang $E_2 \rightarrow E_1$ wird durch das *externe* Photonfeld induziert/stimuliert

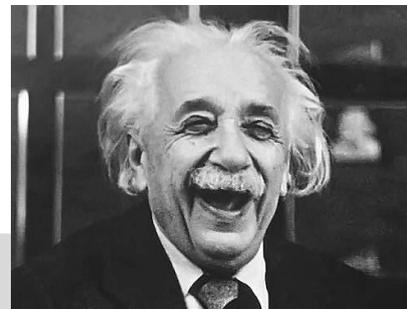


stimulierte Emission



Light Amplification

mein Prinzip!



Laser – 102 Jahre stimulierte Emission

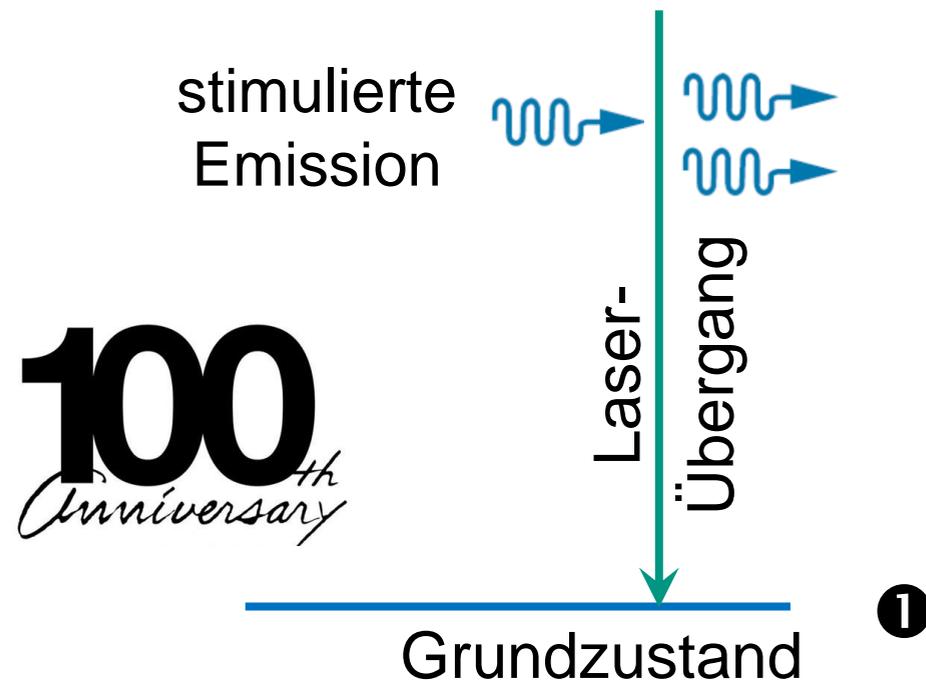
- **stimulierte Emission**: dritter Quantenprozess von Photonen mit Atomen neben Absorption & spontaner Emission

3. Zur Quantentheorie der Strahlung

[1] von A. Einstein.

Die formale Ähnlichkeit der Kurve der chromatischen Verteilung der Temperaturstrahlung mit dem Maxwell'schen Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz 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

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



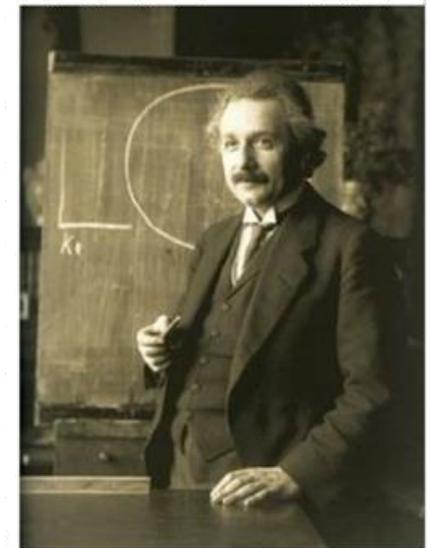
March 15, 1917: Einstein Publishes “On the Quantum Theory of Radiation”

MARCH 15, 2017

Einstein Publishes “On the Quantum Theory of Radiation”

In the new issue of *Physikalische Zeitung* (Physics Newspaper), Vol. 18. No. 6, Einstein publishes his “Zur Quantentheorie der Strahlung” (The Quantum Theory of Radiation).

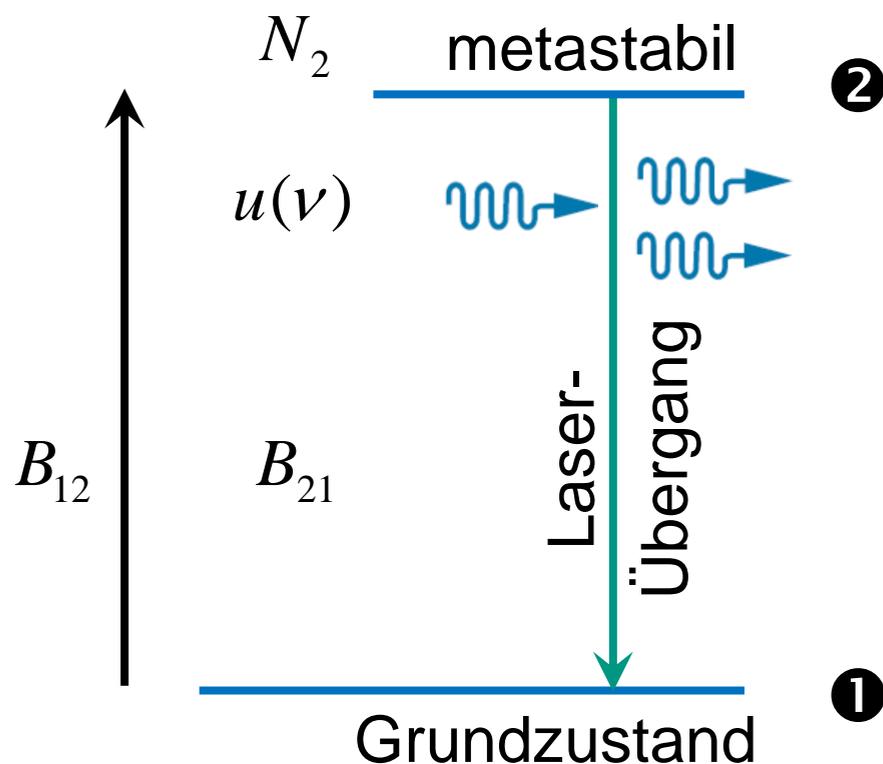
Until this paper, it is assumed that the fundamental interactions of radiation with matter are twofold: matter can absorb radiation with a certain probability, entering a more energetic, “excited” state, or matter in an excited state can emit radiation with a certain probability. This, it is assumed, completely describes the physics involved. Einstein realizes that a detailed working out of the



Albert Einstein

Laser – stimulierte Emission

- **stimulierte Emission** führt zu einem Strahl **kohärenter Photonen**:
gleiche Energie (Frequenz, Wellenlänge) , gleiche Richtung, gleiche Phase & gleiche Polarisation
- die Amplitude der Photonen addiert sich, bei N Photonen ergibt sich:
Amplitude $A \sim N$, **Laser-Intensität $I = |A|^2 \sim N^2$**



$$\frac{dN_{21}}{dt} = -B_{21} \cdot N_2 \cdot u(\nu)$$

| | Strahlungsfeld
angeregter Zustand

- Einstein: $B_{21} = B_{12}$ (Absorption),
Übergangsrate $E_2 \rightarrow E_1$ daher

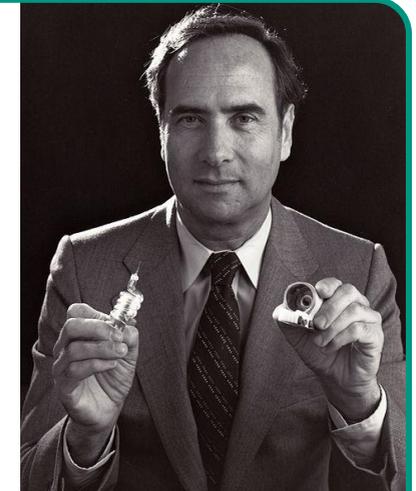
$$N(E_2 \rightarrow E_1) = B_{21} \cdot \underbrace{(N_2 - N_1)} \cdot u(\nu)$$

Besetzungsinversion!

Laser – historische Anfänge mit Rubin

■ **Theodore H. Maiman** demonstriert am 16. Mai 1960 den ersten funktionierenden Laser

- Rubinlaser mit Pumpen durch Xe-Blitzlampe
- *“A laser is a solution seeking a problem”*
- 2-malige erfolglose Nobelpreis-Nominierung



United States Patent Office

3,353,115

Patented Nov. 14, 1967

1

3,353,115

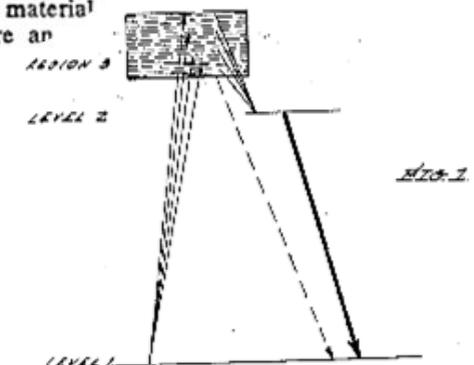
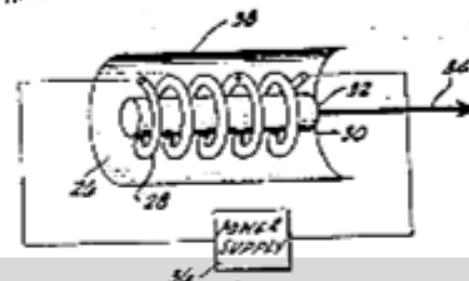
RUBY LASER SYSTEMS

Theodore H. Maiman, Los Angeles, Calif., assignor to Hughes Aircraft Company, Culver City, Calif., a corporation of Delaware
Continuation of application Ser. No. 102,698, Apr. 13, 1961. This application Nov. 29, 1965, Ser. No. 516,830
2 Claims. (Cl. 331—94.5)

This application is a continuation of my copending application Ser. No. 102,698 entitled, Laser Systems, filed Apr. 13, 1961 now abandoned.
This invention

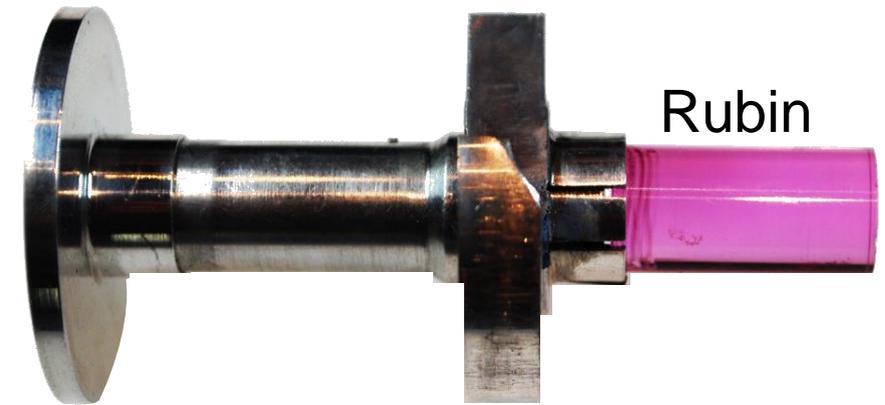
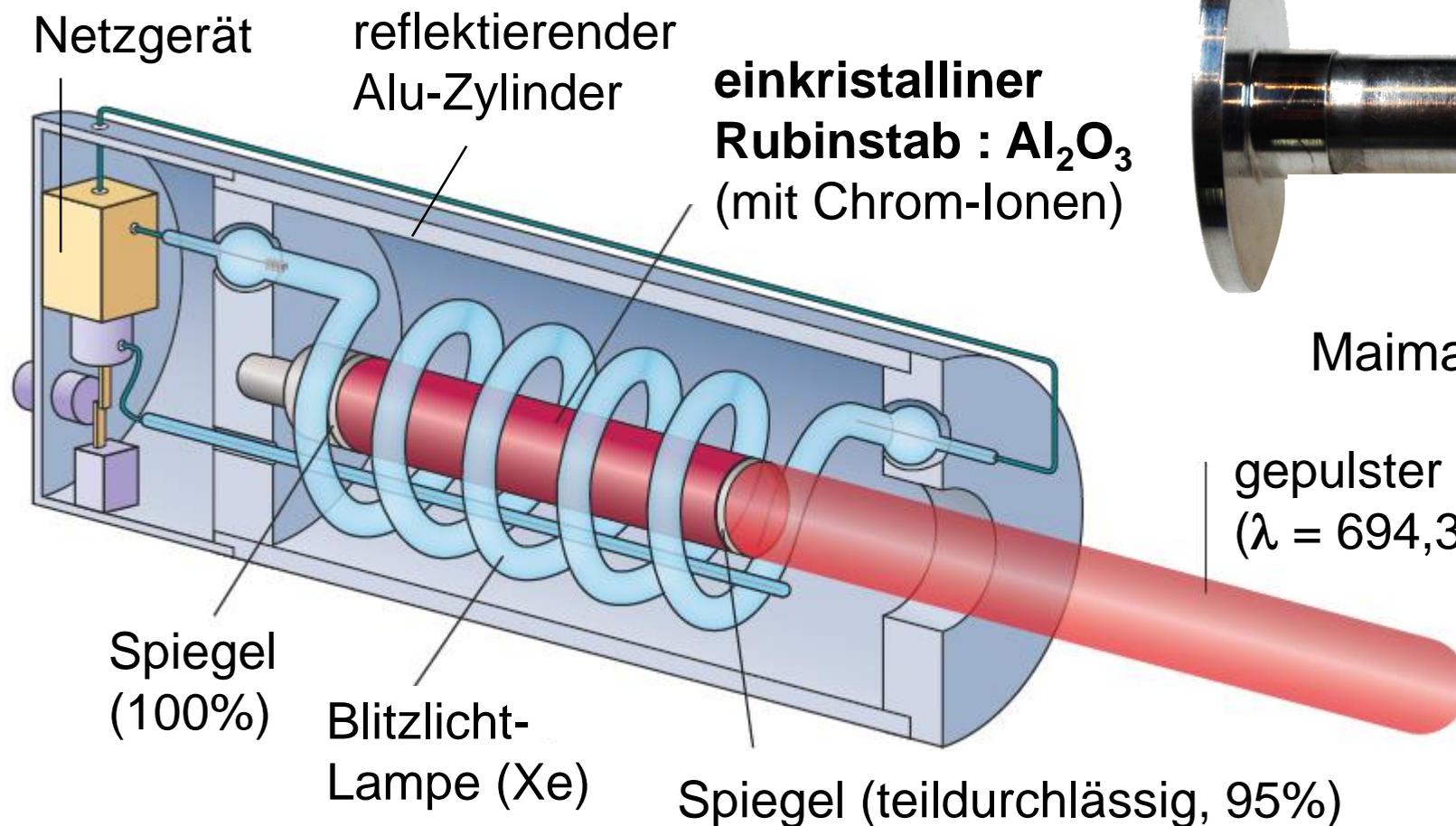
2
emission and a coherent wave propagating through the medium. In addition, the frequency of operation of any given gas laser may be effectively tuned only by Stark or Zeeman effects which can provide a tuning range of only approximately 5×10^{10} cycles per second. Further, the construction of a gas cell is extremely critical in that the end plates must be highly reflective so that the many reflections in the density gaseous material

10 It is therefore an object of the present invention to provide a laser system which



Rubinlaser – Aufbau eines 3-Level Lasers

- **Grundlagen eines Rubin-Lasers:** Beispiel für Festkörper-Laser
 - Besetzungsinversion durch **optisches Pumpen** (Xenon-Blitzlicht), gepulster Betrieb (typische Pulslänge ~ ms)
 - stimulierte Emission



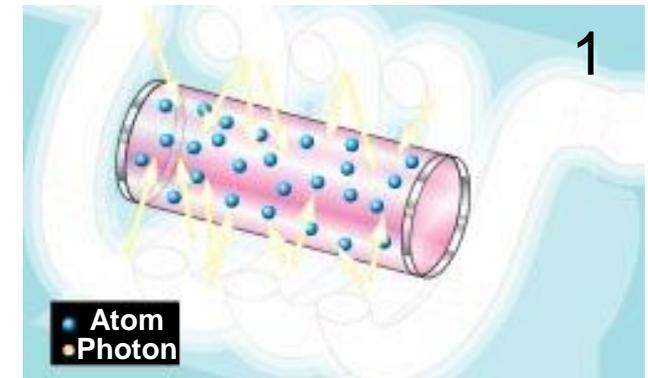
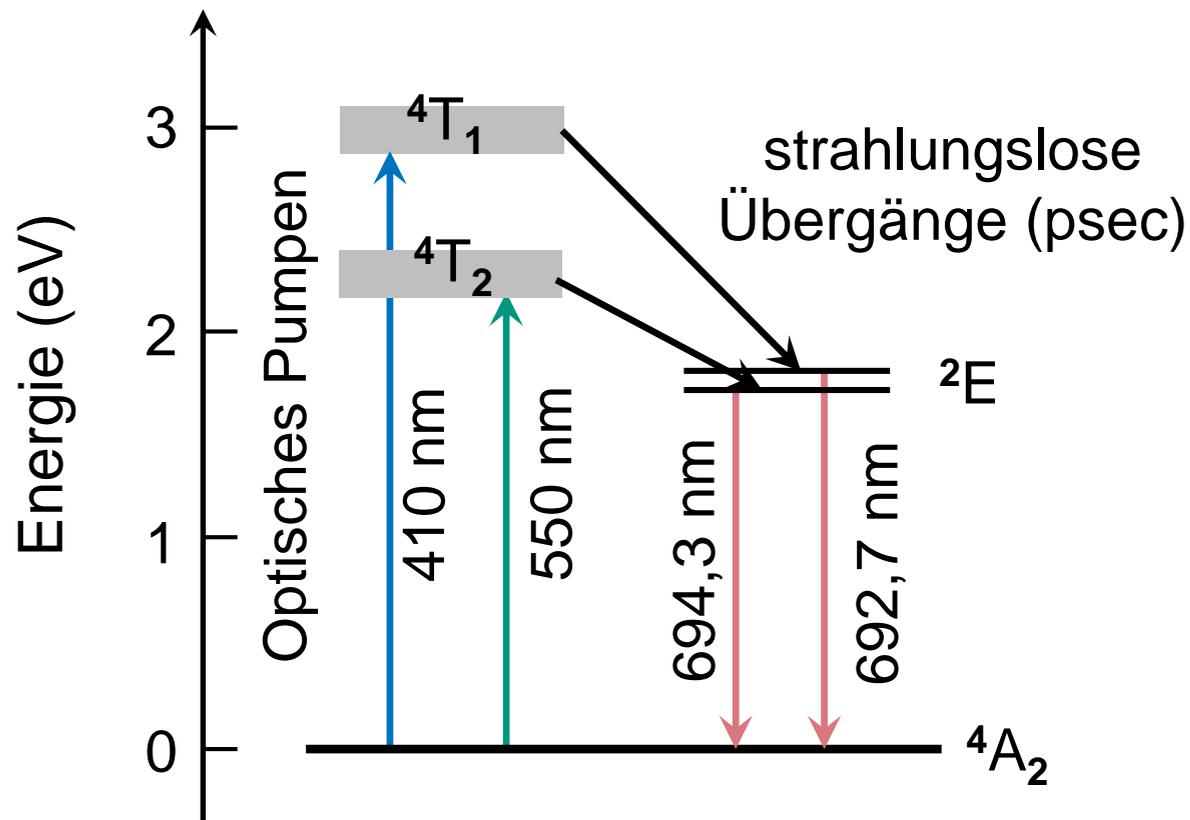
Maiman's originaler Laser

gepulster Laserstrahl
($\lambda = 694,3 \text{ nm}$ mit $\Delta\lambda = 0,5 \text{ nm}$)

Rubinlaser - Aufbau

■ Grundlagen eines Rubin-Lasers:

- optisches Pumpen mit einer **Xenon-Gasentladungslampe** (410 / 550 nm)
- **strahlungslose Übergänge** zu den Laserniveaus

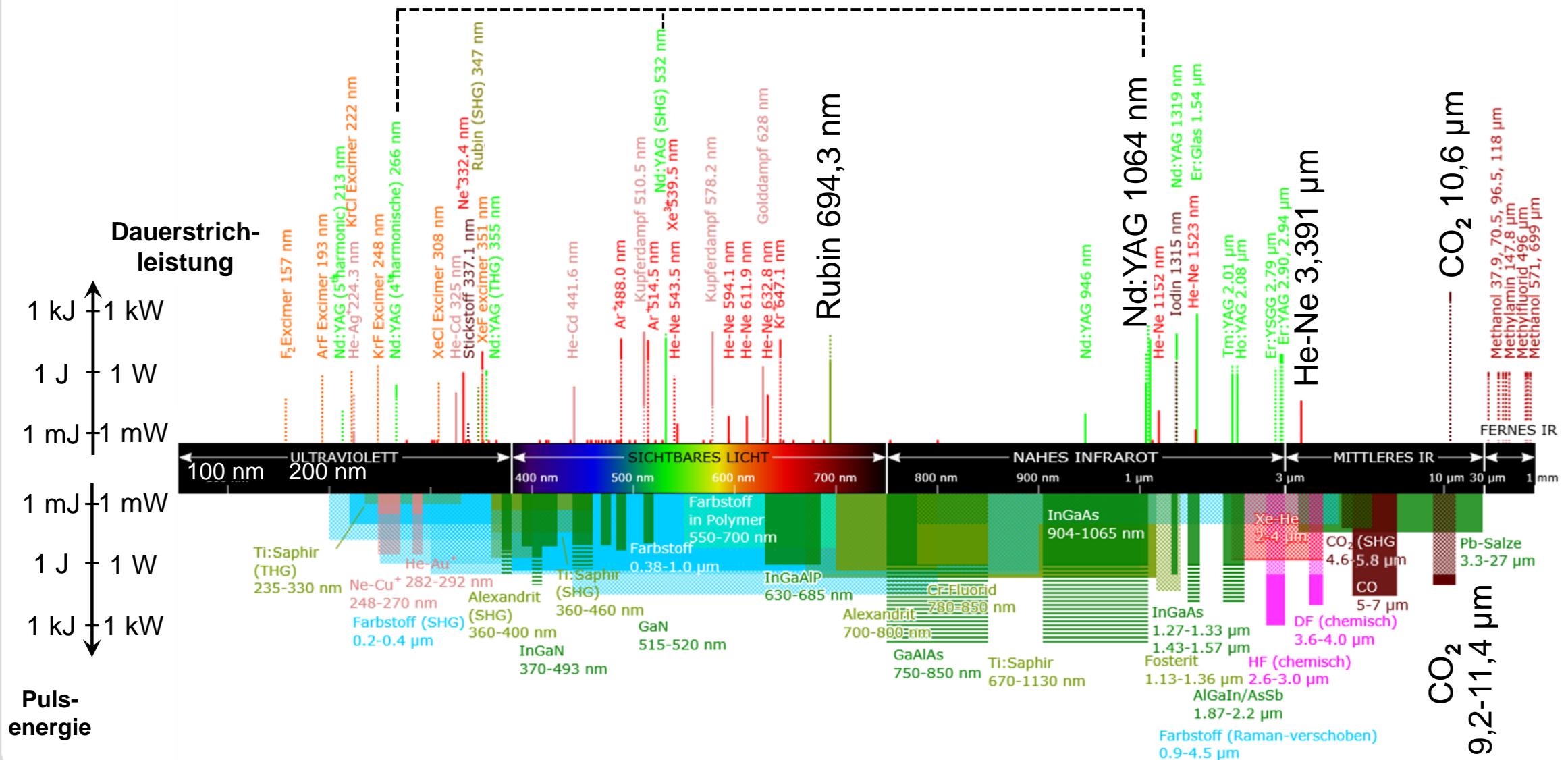


Laser – Wellenlängen & Intensitäten

■ Laserquellen: vom UV bis fernem IR

Frequenz-
verdopplung

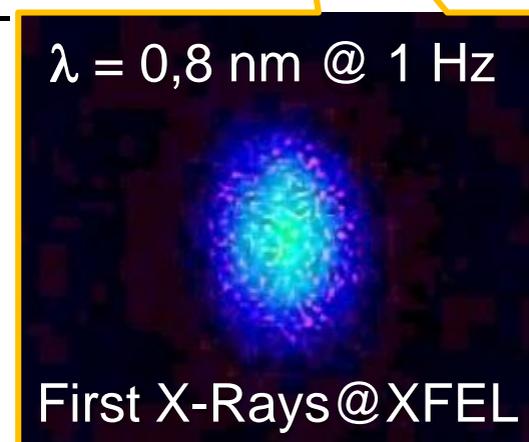
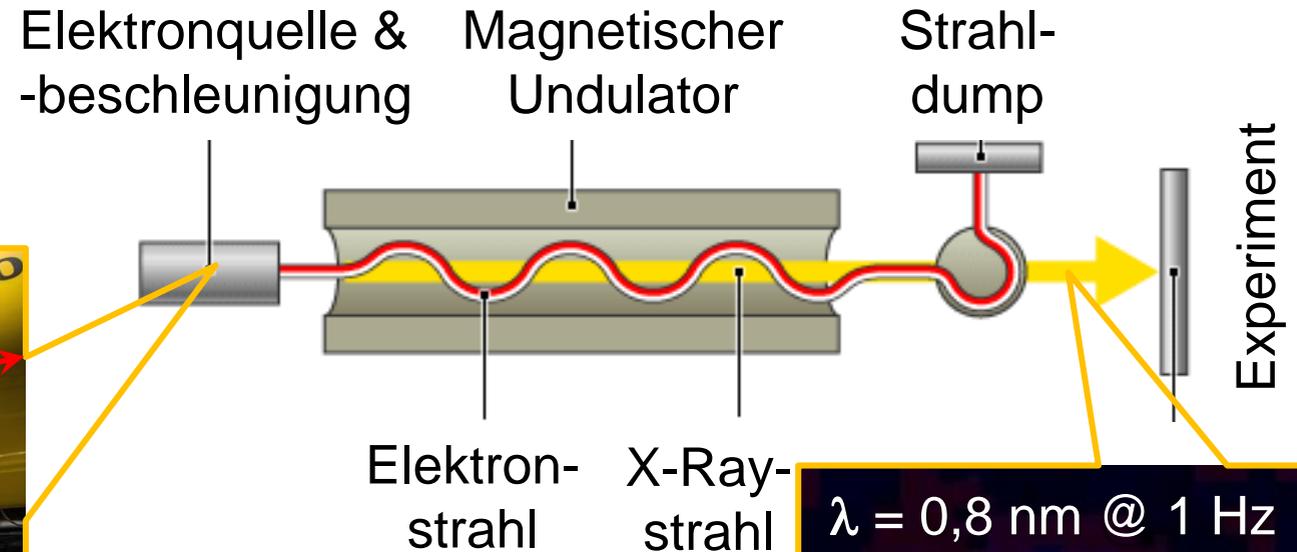
Nd:YAG 266 nm Nd:YAG 532 nm ← Nd:YAG 1064 nm



European XFEL – Röntgenlaser

■ XFEL: X-Ray Free-Electron Laser

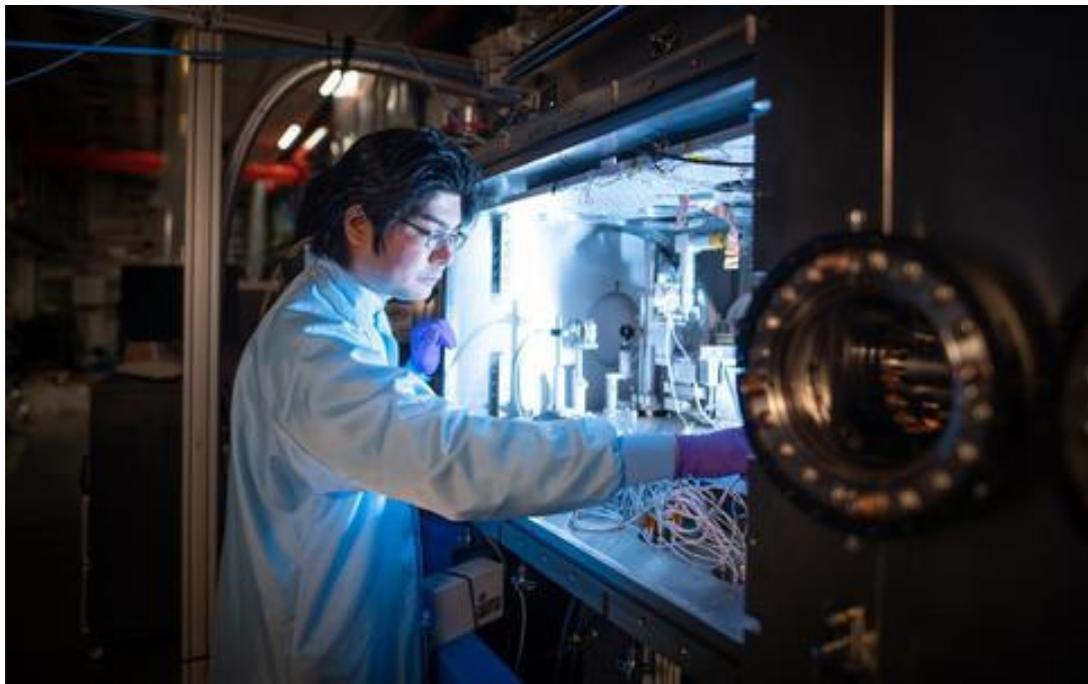
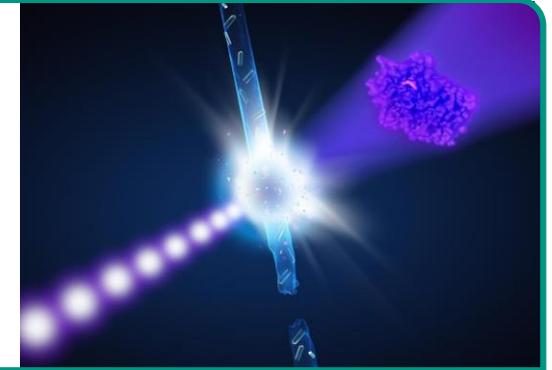
- 3,4 km langer Elektronbeschleuniger am DESY
- Erzeugung von kohärenter Röntgenstrahlung
- $\lambda = 0,05 - 5 \text{ nm}$ innerhalb $\Delta t < 100 \text{ fs}$



European XFEL – Röntgenlaser

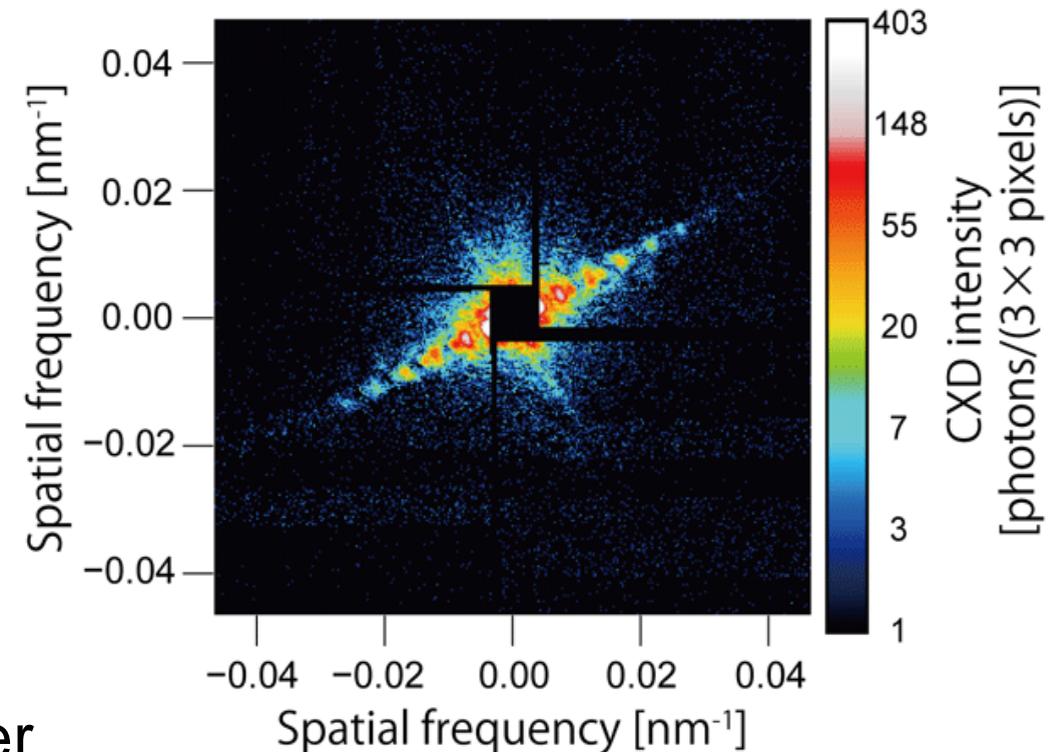
■ XFEL: X-Ray Free-Electron Laser

- 27.000 Röntgenblitze/s:
3D-Bilder von Molekülen,
Ablauf von chemischen Reaktionen,...



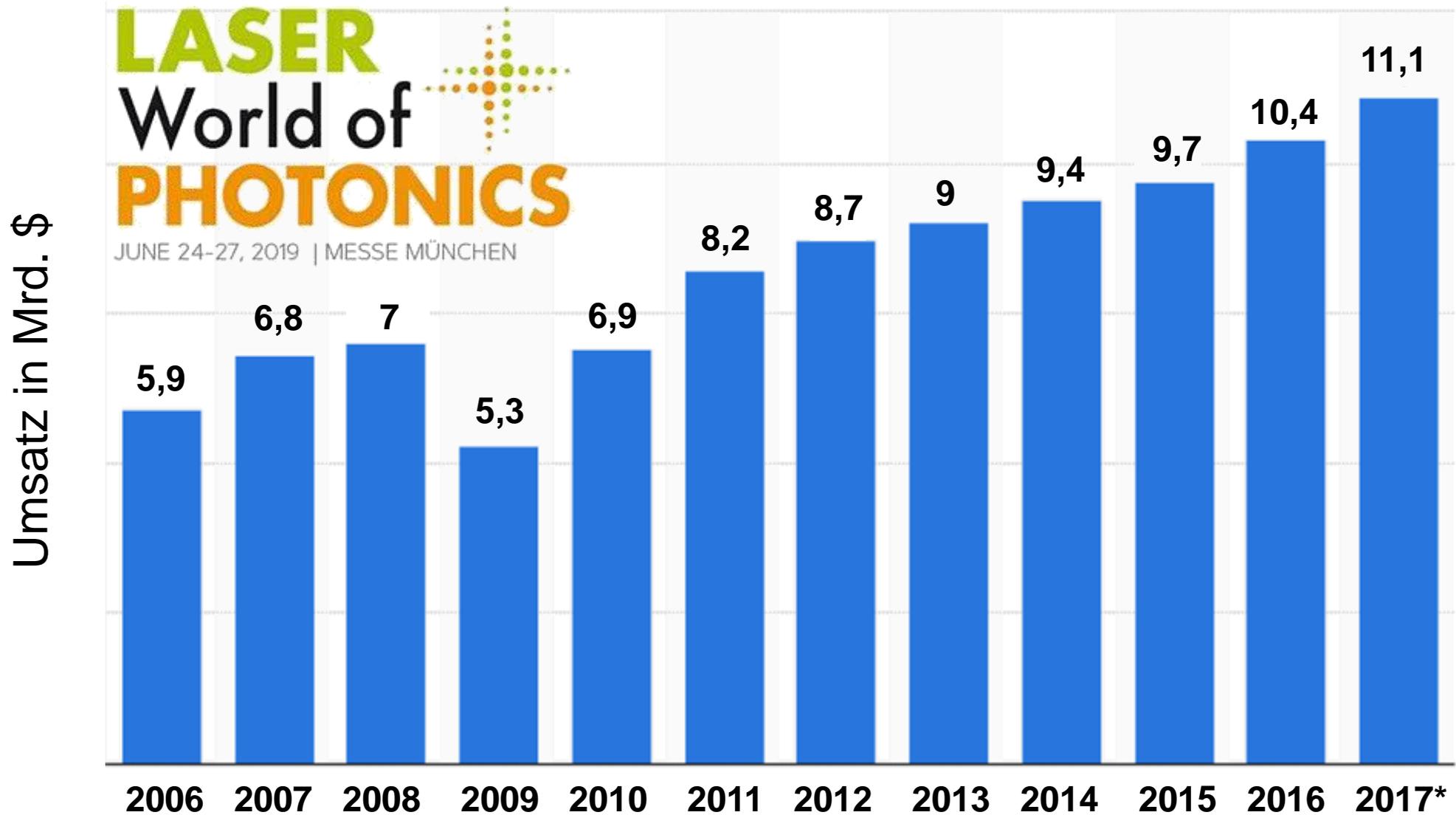
Präparationsarbeiten an Probenkammer

CXD pattern from a living cell
exposed to single XFEL pulse



Laser – Anwendungen

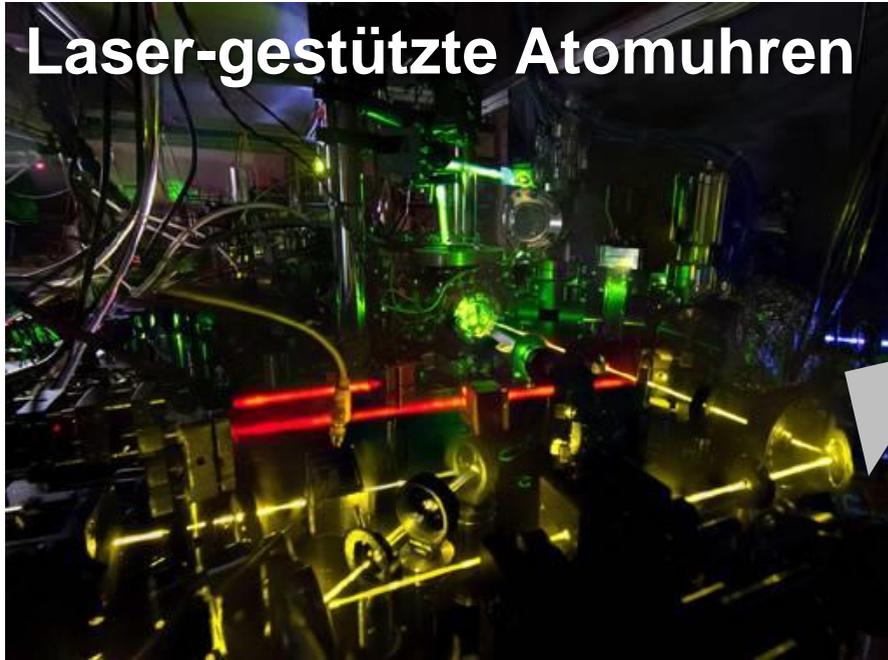
■ Globaler Umsatz mit Lasern von 2006 - 2016



Quelle
Strategies Unlimited

Laser – Anwendungen

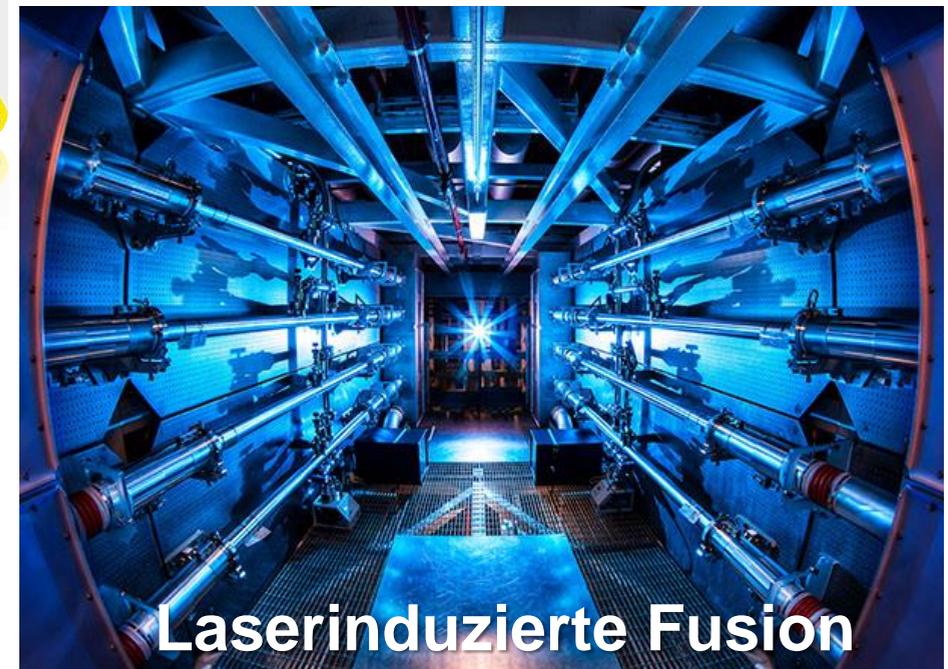
Laser-gestützte Atomuhren



Laserbasierte adaptive Optik



Laserinterferometer für GW



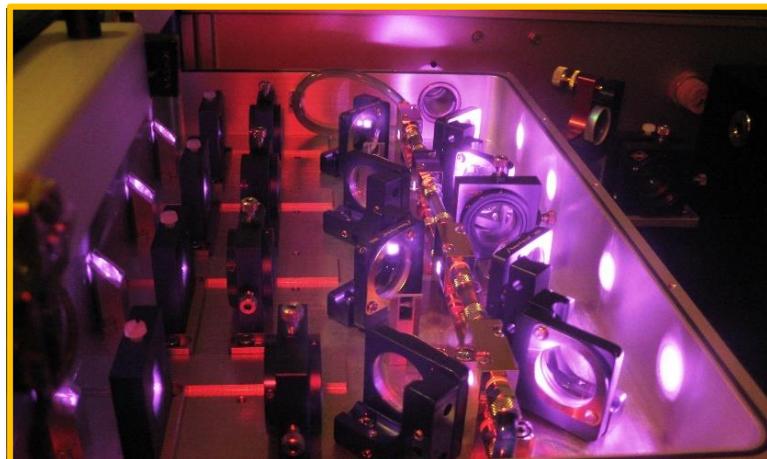
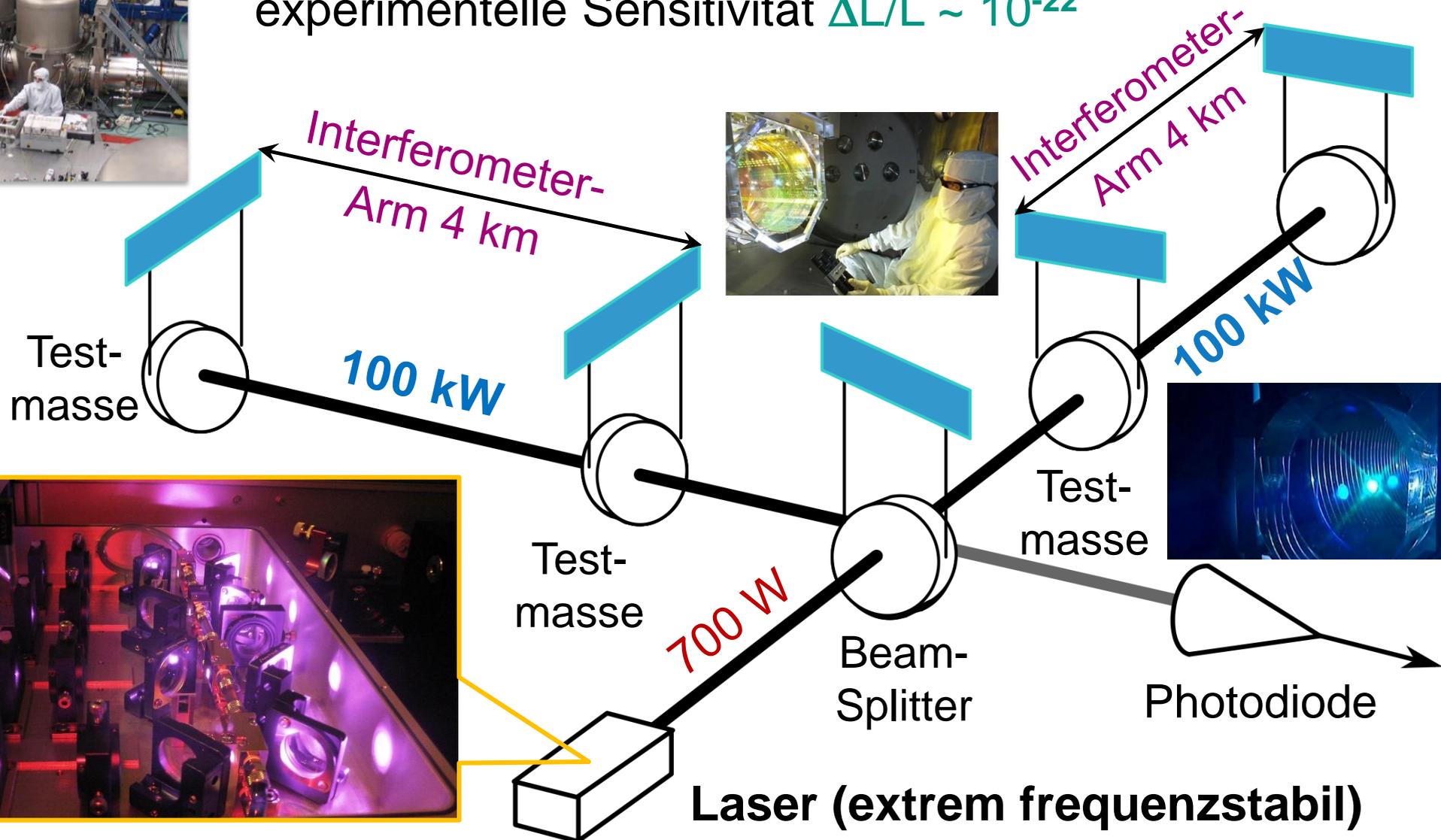
Laserinduzierte Fusion



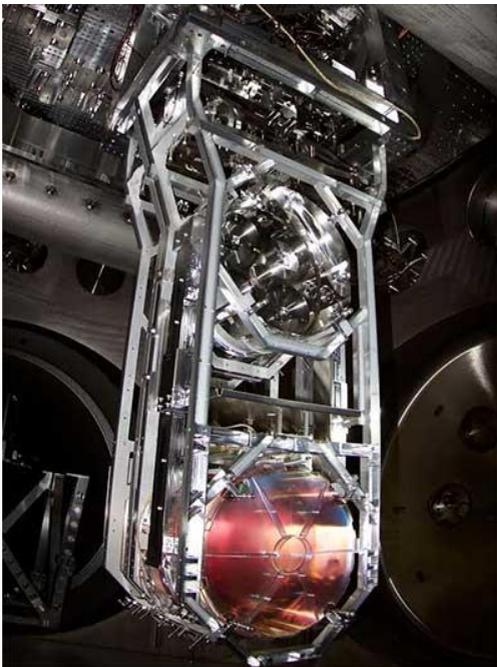
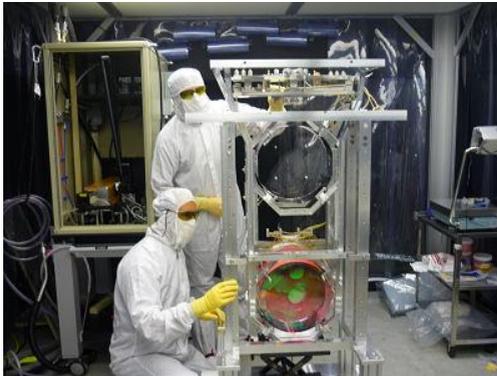
Laserinterferometer für Gravitationswellen

■ Laser-basierte Interferometer zum Nachweis von Gravitationswellen

experimentelle Sensitivität $\Delta L/L \sim 10^{-22}$



■ Schwingungsdämpfung: - 4-fache Dämpfung der 40 kg Testmasse

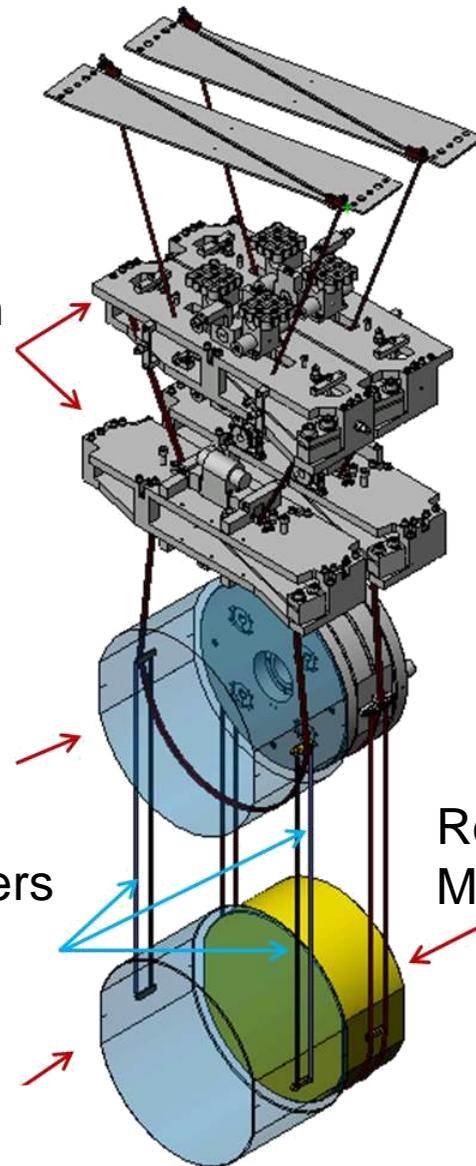


Metallmassen
(Pendel 1&2)

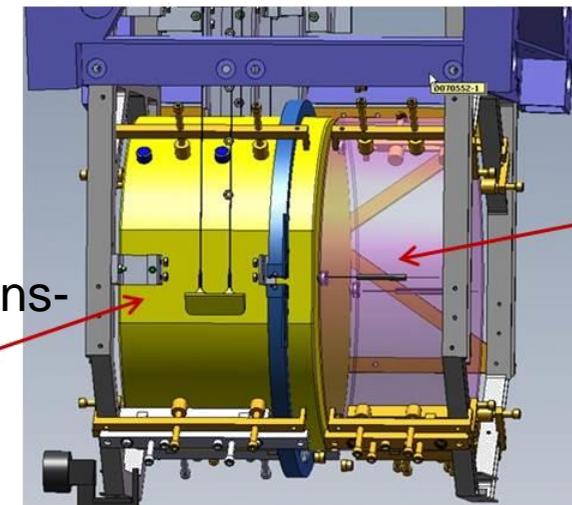
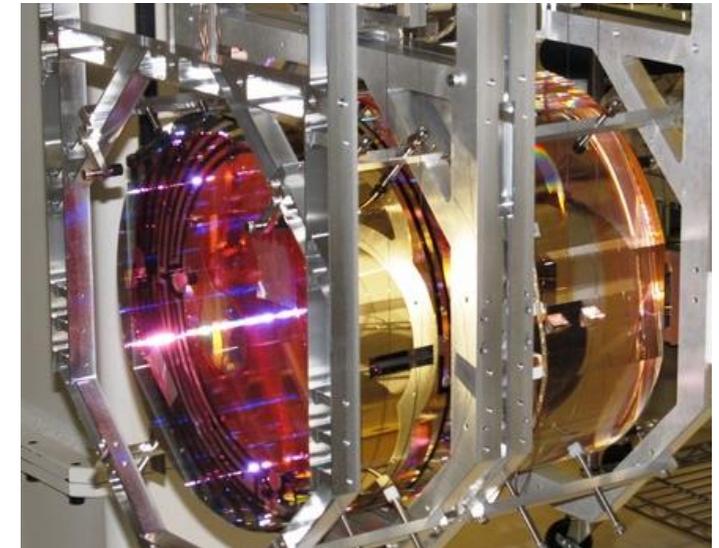
Spiegel
(Pendel 3)

0.4 mm Fibers
(Quarzglas)

40 kg
Testmasse
(Pendel 4)



Reaktions-
Masse



Test-
Masse

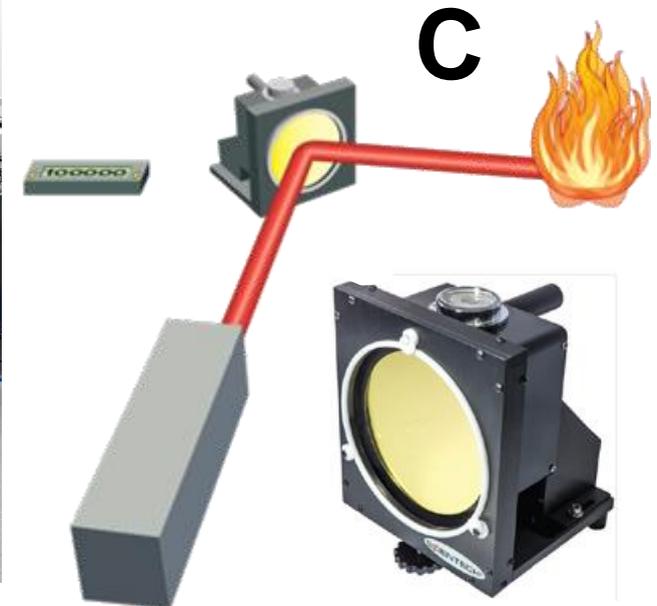
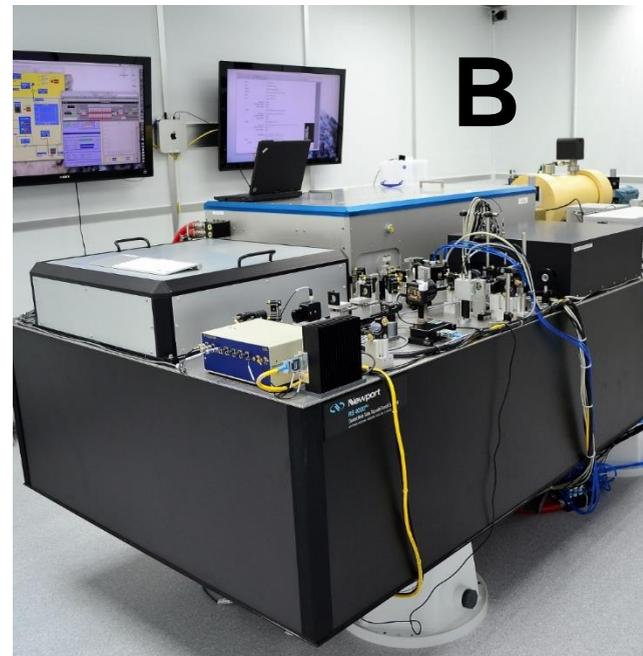
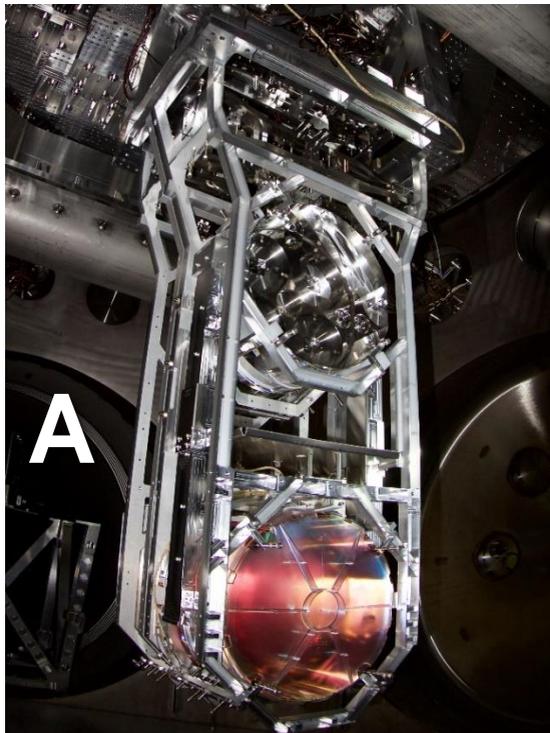
Fun with Facts: Laser-Interferometer

Wieso erhöht man die Laserintensität nicht einfach auf >100 kW?

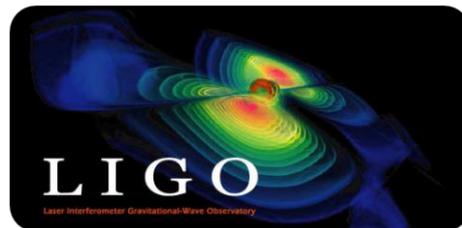
- A) Strahlungsdruck auf die Spiegel wird zu groß!
- B) Erzeugung der Intensität ist am technischen Limit!
- C) Absorption im Beam Splitter ohne Kühlung zu hoch!

SHELDON COOPER
presents
~~FUN WITH FLAGS~~

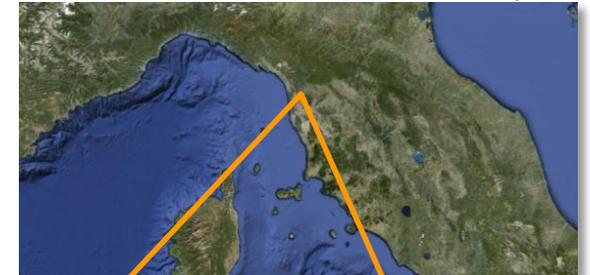
Facts



Experimente: LIGO & VIRGO



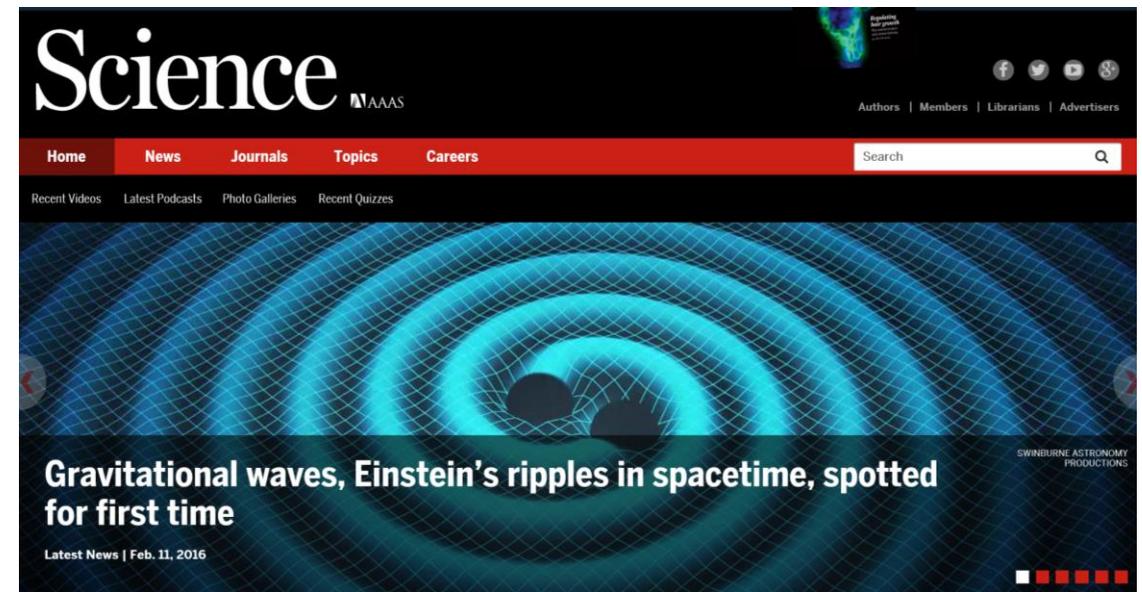
- **LIGO** - Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (2 Experimentierorte in den USA: Hanford & Livingston)
- **VIRGO** – ital. Experimentierort: bei Pisa am European Gravitational Observatory



aLIGO Resultate: GW150914

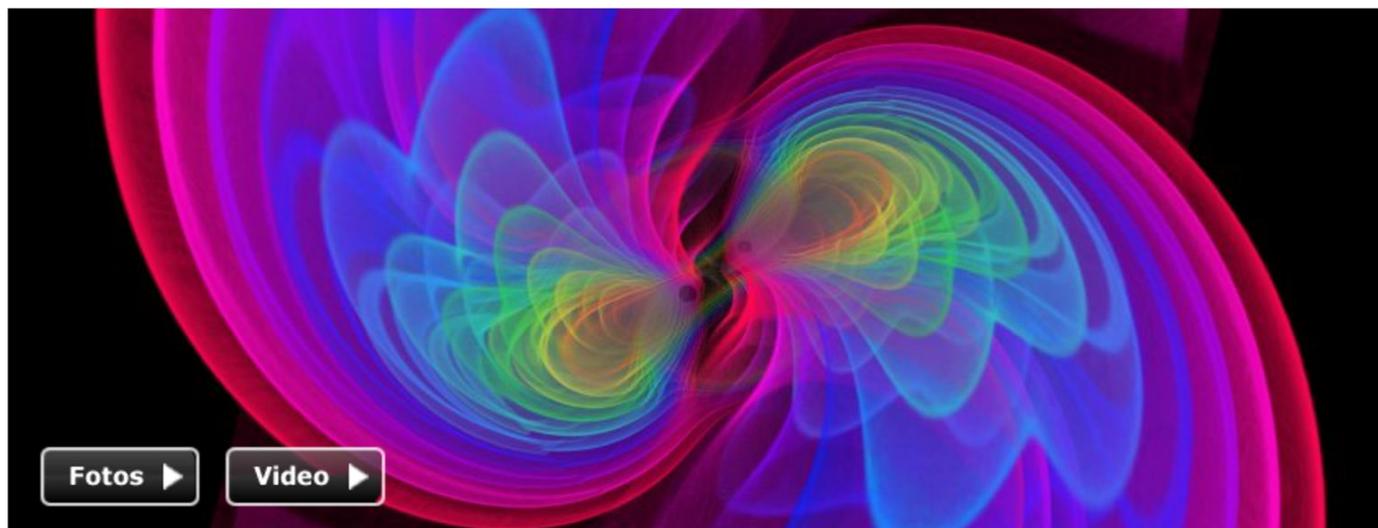
14.9.2015 09:50:45 UT

- 11.2.2016: Veröffentlichung des ersten GW-Nachweises (LIGO) mit Signifikanz 5.1σ aus der **Verschmelzung von 2 stellaren Black Holes**
- beobachtet am 14.9.2015 09:50



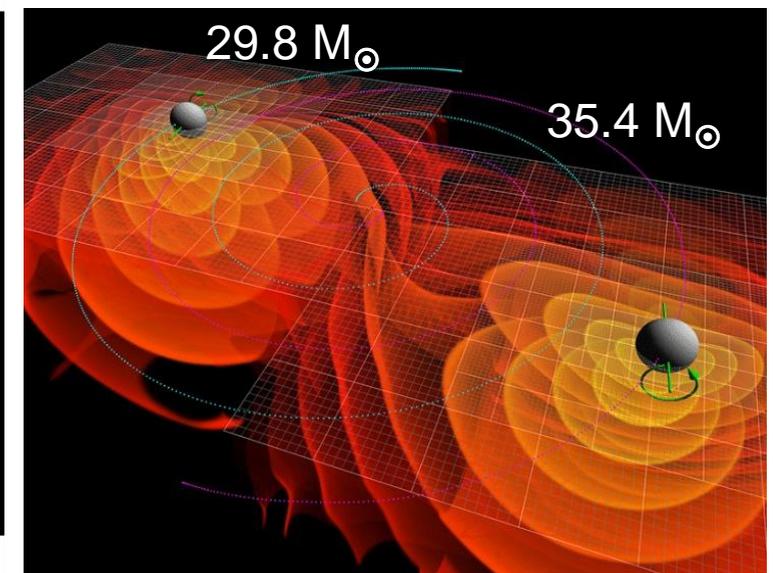
Revolutionäre Entdeckung

Physiker messen erstmals Gravitationswellen



Es ist eine Jahrhundertensation: Albert Einstein hatte sie einst theoretisch hergeleitet, nun haben Forscher erstmals Gravitationswellen nachgewiesen. Sie öffnen einen völlig neuen Blick auf das Universum. *Von Christoph Seidler mehr...* [Video | Forum]

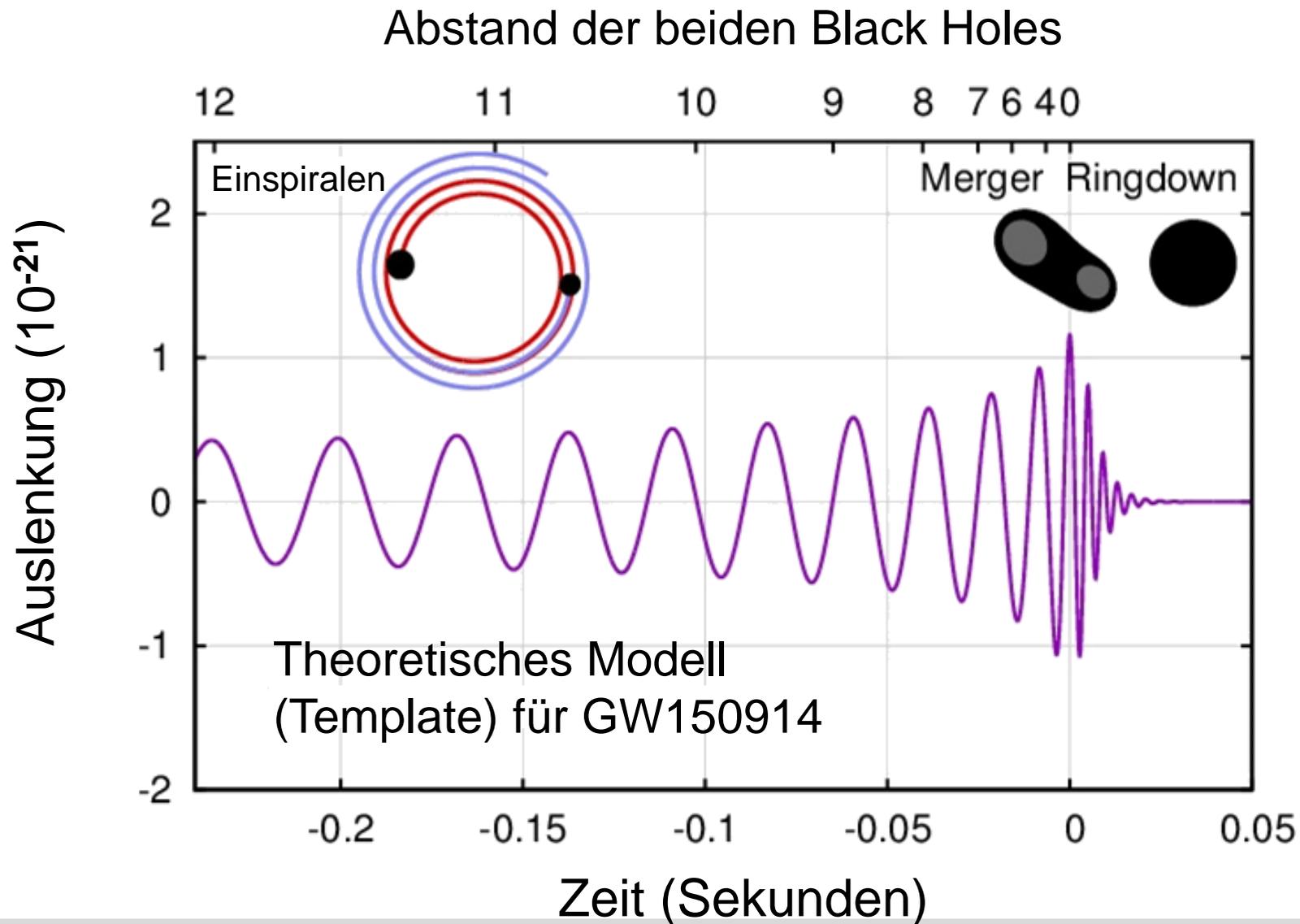
Fotostrecke: Das sind Einsteins Wellen



GW150914: Modellierung

■ Advanced LIGO Resultate:

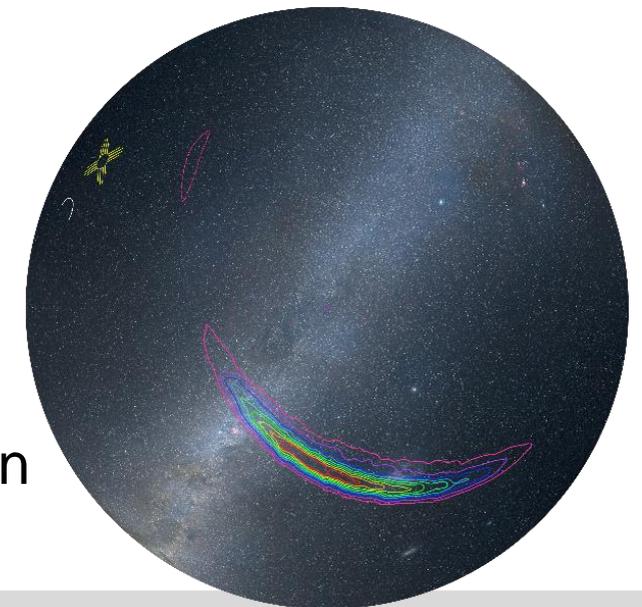
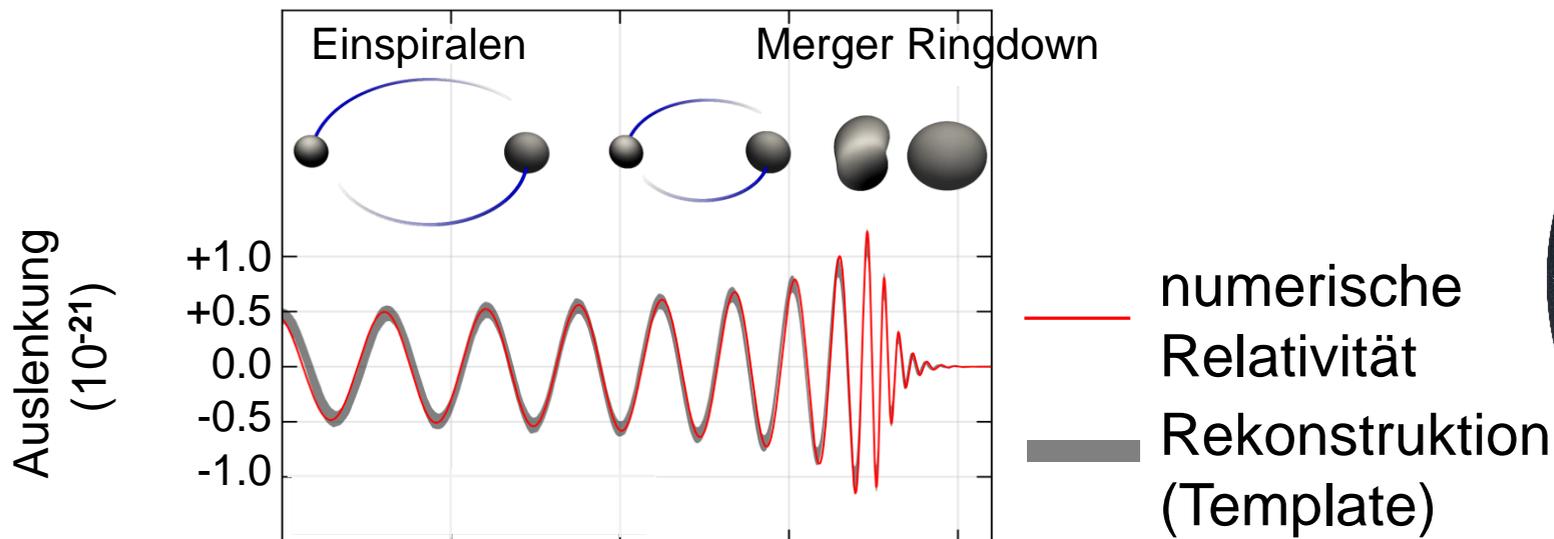
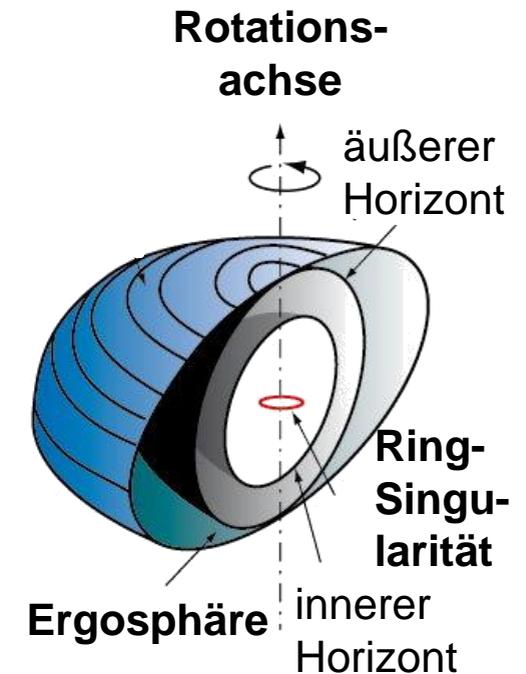
Modellierung & Vergleich des GW Signals liefert detaillierte BH-Parameter



GW150914: Eigenschaften

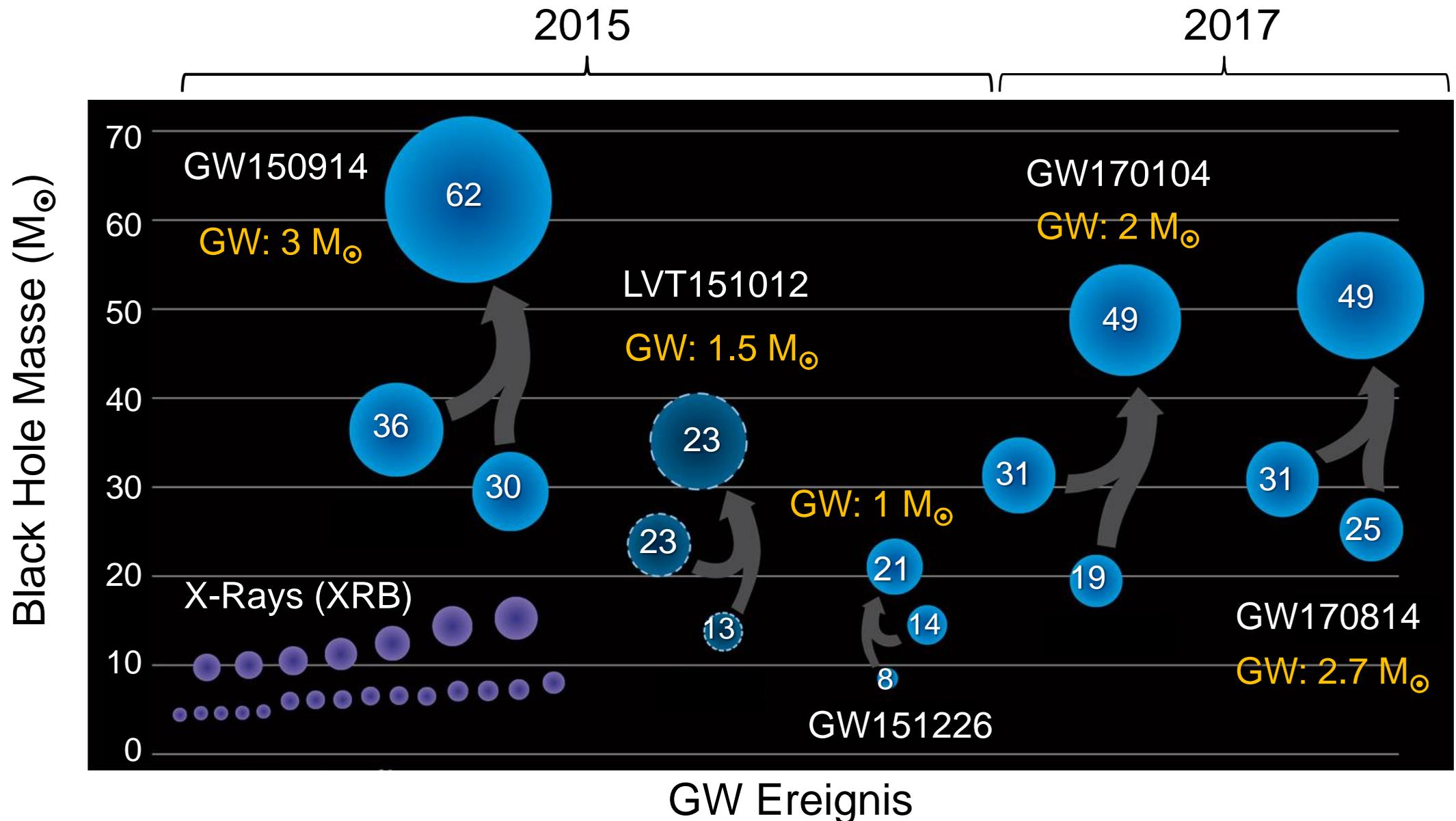
Advanced LIGO Resultate: extrahierte BH-Parameter

GW Parameter	Resultat
Abstand d	(440 ± 170) Mpc, $z = 0.093$
BH1 – Masse (M_{\odot})	$35.4 (+5.0, -3.4)$
BH2 – Masse (M_{\odot})	$29.8 (+3.3, -4.3)$
Post BH – Masse (M_{\odot})	$62.2 (+3.7, -3.4)$
Post BH – Spin (dimensionslos)	$0.68 (+0.05, -0.06)$
abgestrahlte GW Energie (M_{\odot})	3.0 ± 0.5



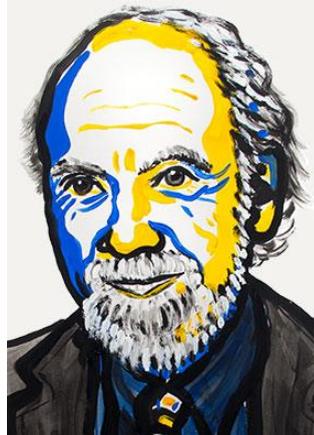
Überblick über Black Hole Mergers

- **Advanced LIGO:** Nachweis von 4 BH Mergers + 1 Kandidaten-Ereignis



Nobelpreis in Physik 2017

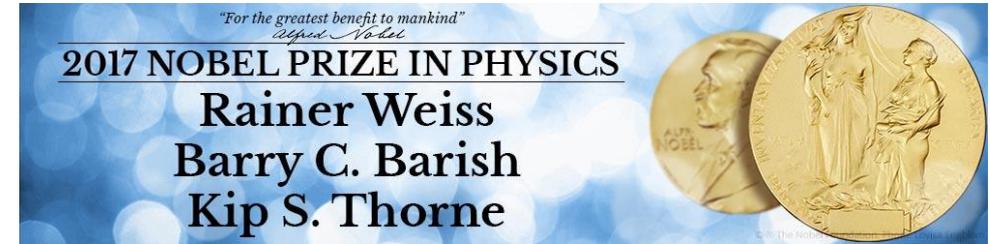
■ Nobelpreis 2017: Nachweis von Gravitationswellen



Rainer Weiss

Barry Barish

Kip Thorne



The 2016 Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics

Citation: For the observation of gravitational waves, opening new horizons in astronomy and physics.

BREAKTHROUGH PRIZE



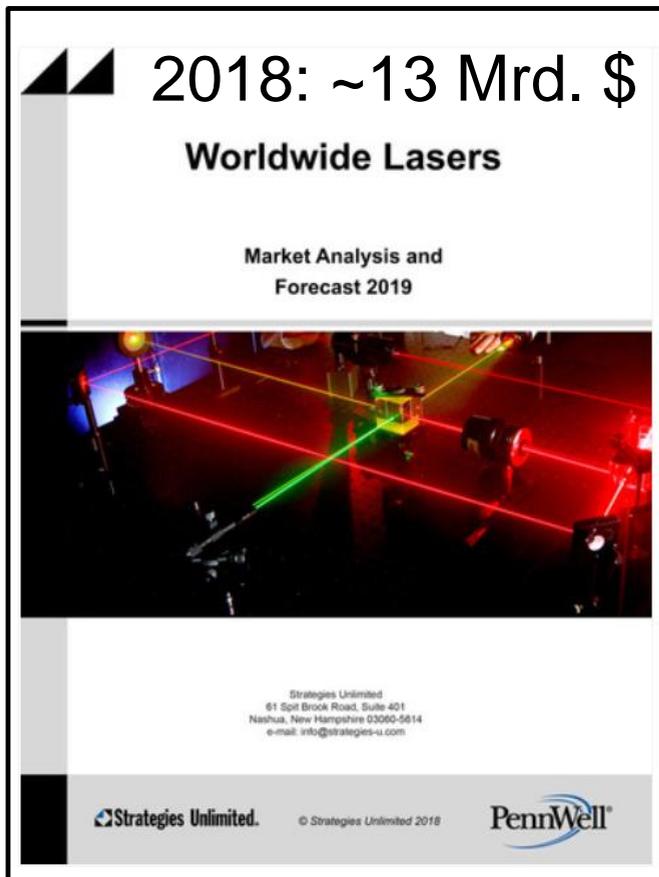
LIGO
Scientific
Collaboration



Atome: wichtige Aspekte

- **Atome und ihre Wechselwirkung mit Materie & Licht:** enormes Anwendungspotenzial mit hervorragenden Zukunftsperspektiven im Bereich F&E

RESEARCH AND
DEVELOPMENT

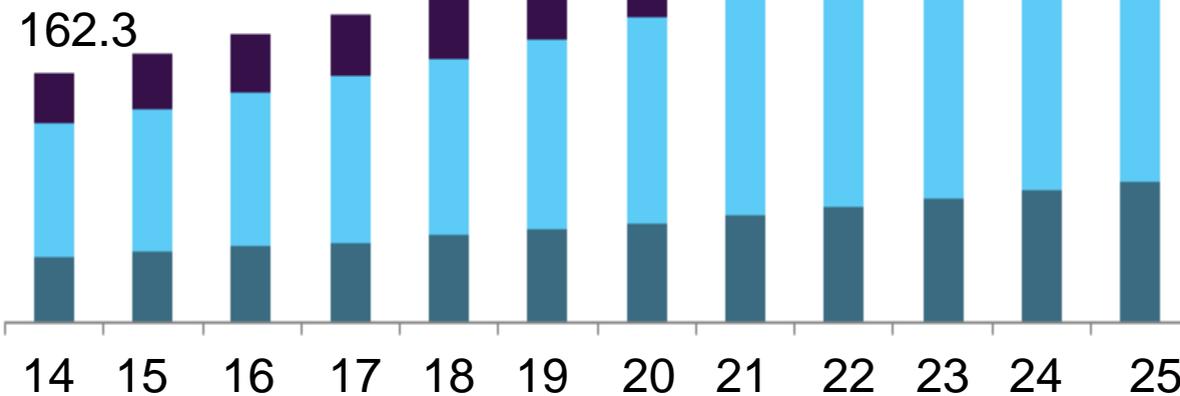


Atome: wichtige Aspekte

- **Atome und ihre Wechselwirkung mit Materie & Licht:**
enormes Anwendungspotenzial mit hervorragenden
Zukunftsperspektiven im Bereich F&E



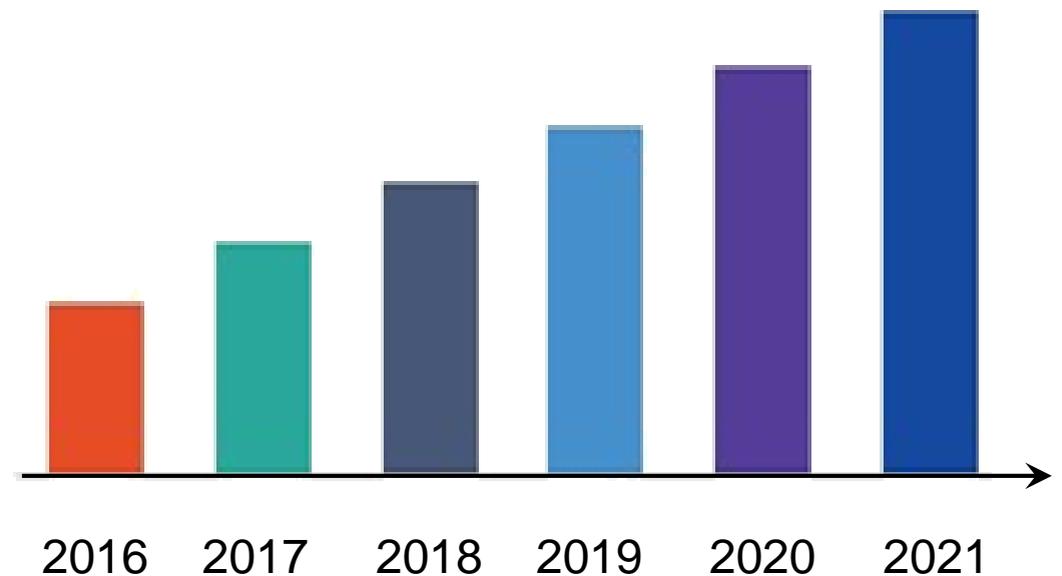
MRI-Markt in China



Feldstärke

- niedrig
- mittel
- hoch

CT-Markt weltweit

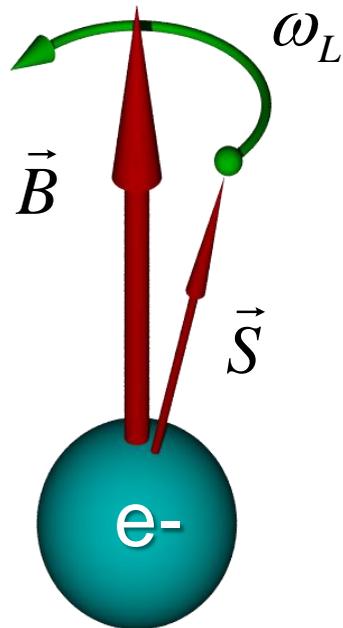


Q: Industry ARC Analysis, Expert Insights

Atome: Frequenzmessung

- neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

„Never measure anything but frequency!“



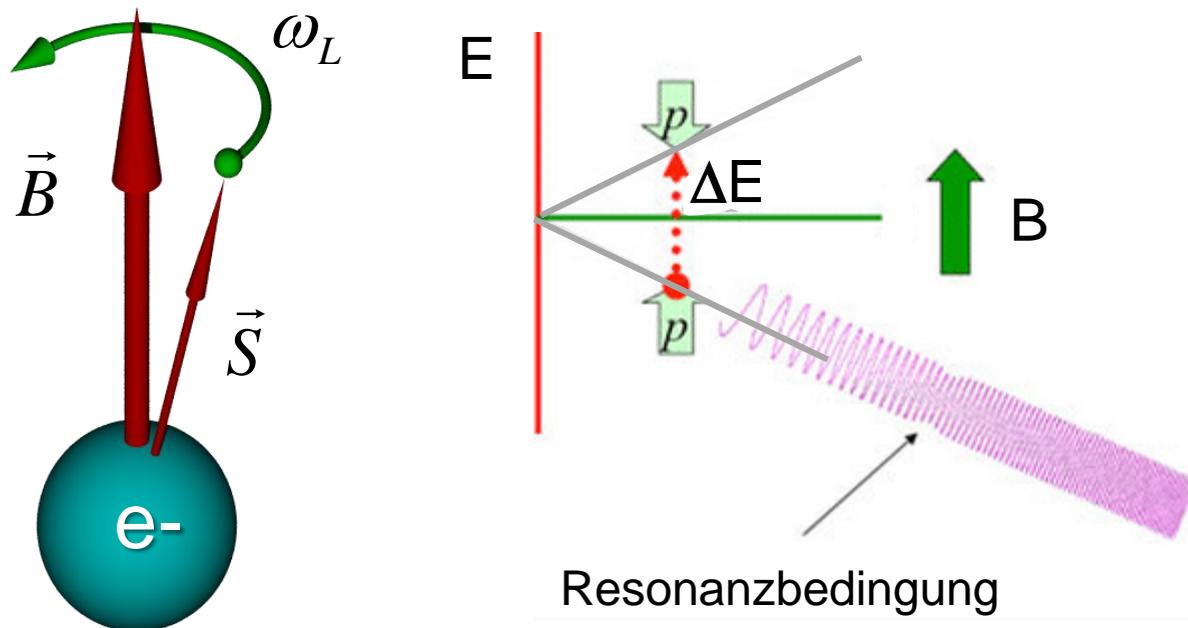
Arthur L. Schawlow
Nobelpreis 1981
für Laserspektroskopie



Atome: Frequenzmessung 1

■ neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

- ein externes B-Feld kann gemessen werden durch die **Frequenz der Larmor-Präzession** eines geladenen Teilchens mit Spin (magnetisches Moment)



$$\omega_L = |\gamma_e| \cdot B$$

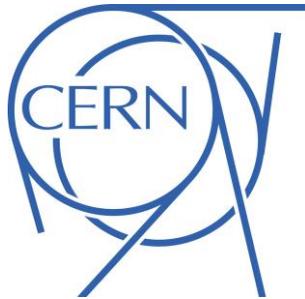
$$\omega_L = \gamma_p \cdot B$$



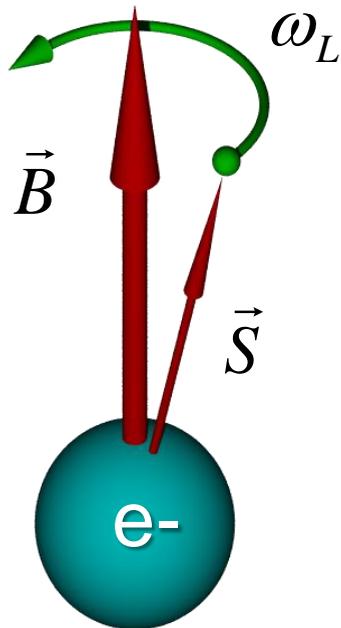
Atome: Frequenzmessung 1

■ neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

- Beispiel: CERN-Start-Up MetroLab



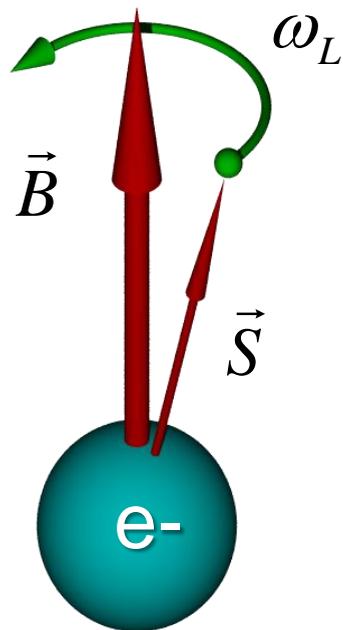
METROLab
Magnetic precision has a name



Atome: Frequenzmessung 1

■ neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

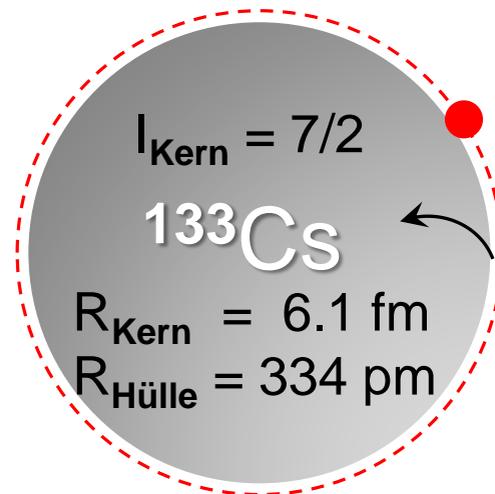
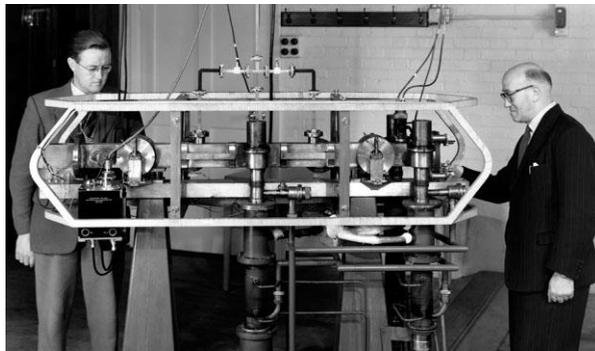
- Beispiel: NMR Präzisions-Teslameter von MetroLab
Probenkopf bis 13 T mit **relativer Präzision < 0,1 ppm**
mit RF-Oszillator mit **f = 30-90 MHz**
NMR mit ^1H und ^2H



Atome: Frequenzmessung 2

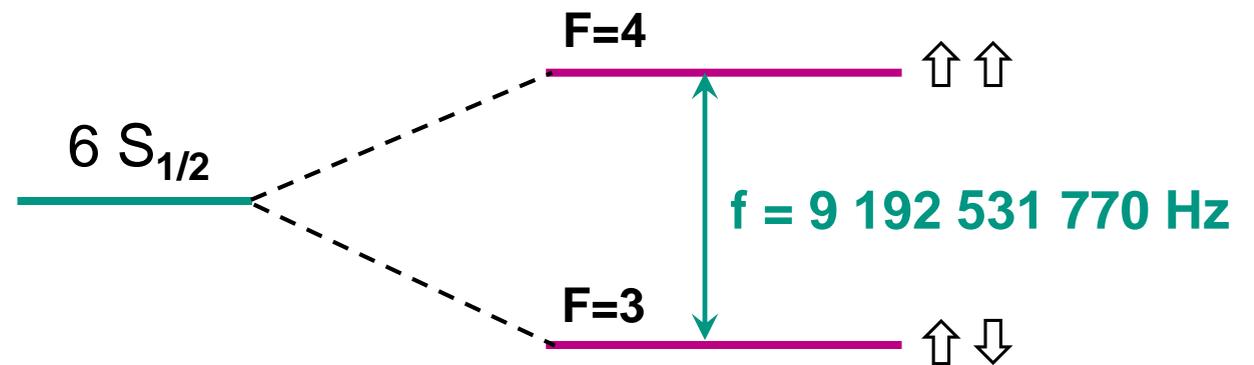
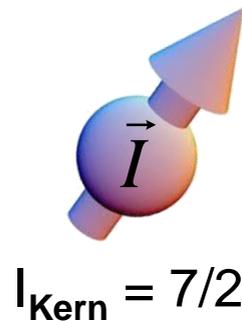
■ neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

- die Frequenz des Hyperfeinstruktur-Übergangs von **Cs-133** ist ein idealer Standard für ultra-präzise Atomuhren



6s Elektron

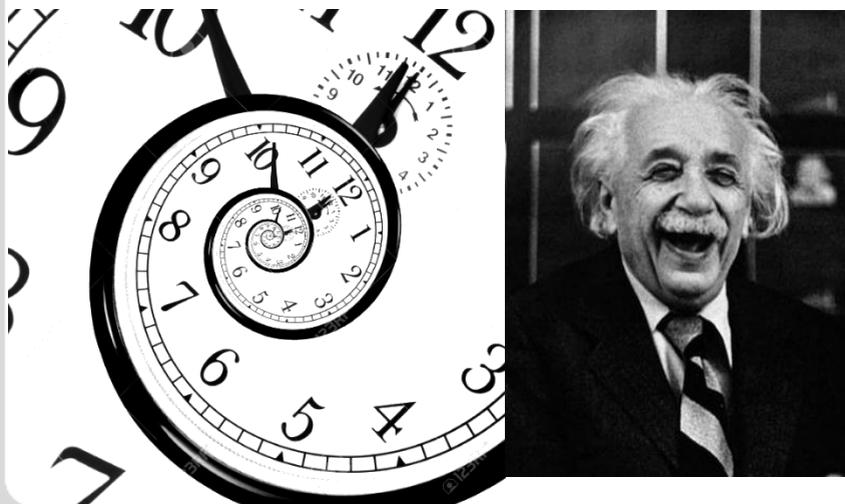
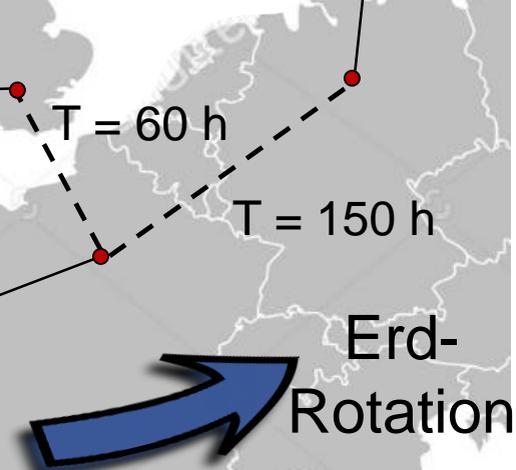
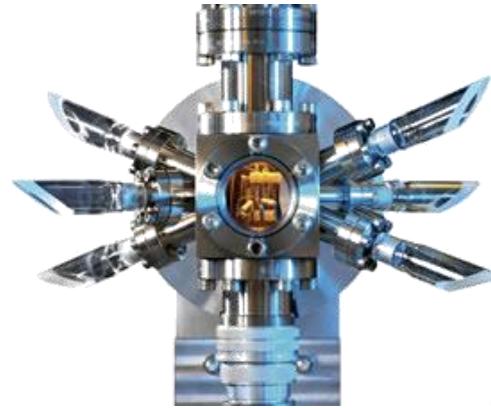
$J = 0$



Atome: Frequenzmessung 2

■ neuartiger Zugang zur Messung fundamentaler Größen

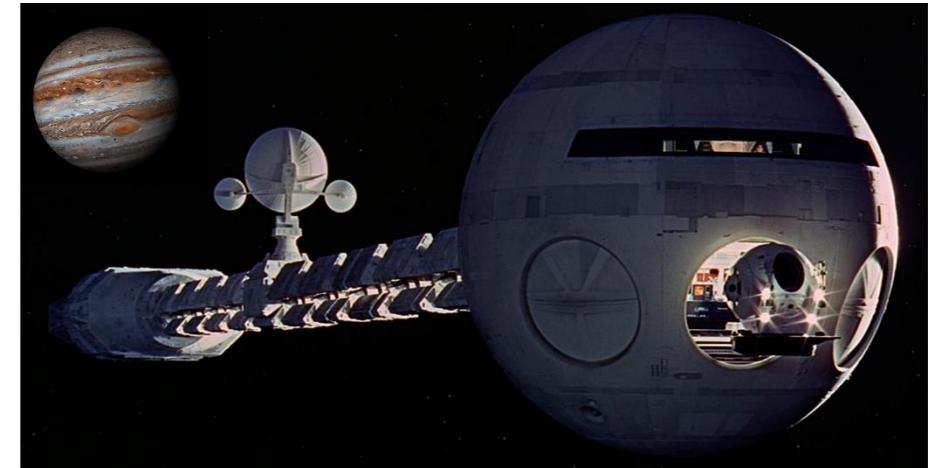
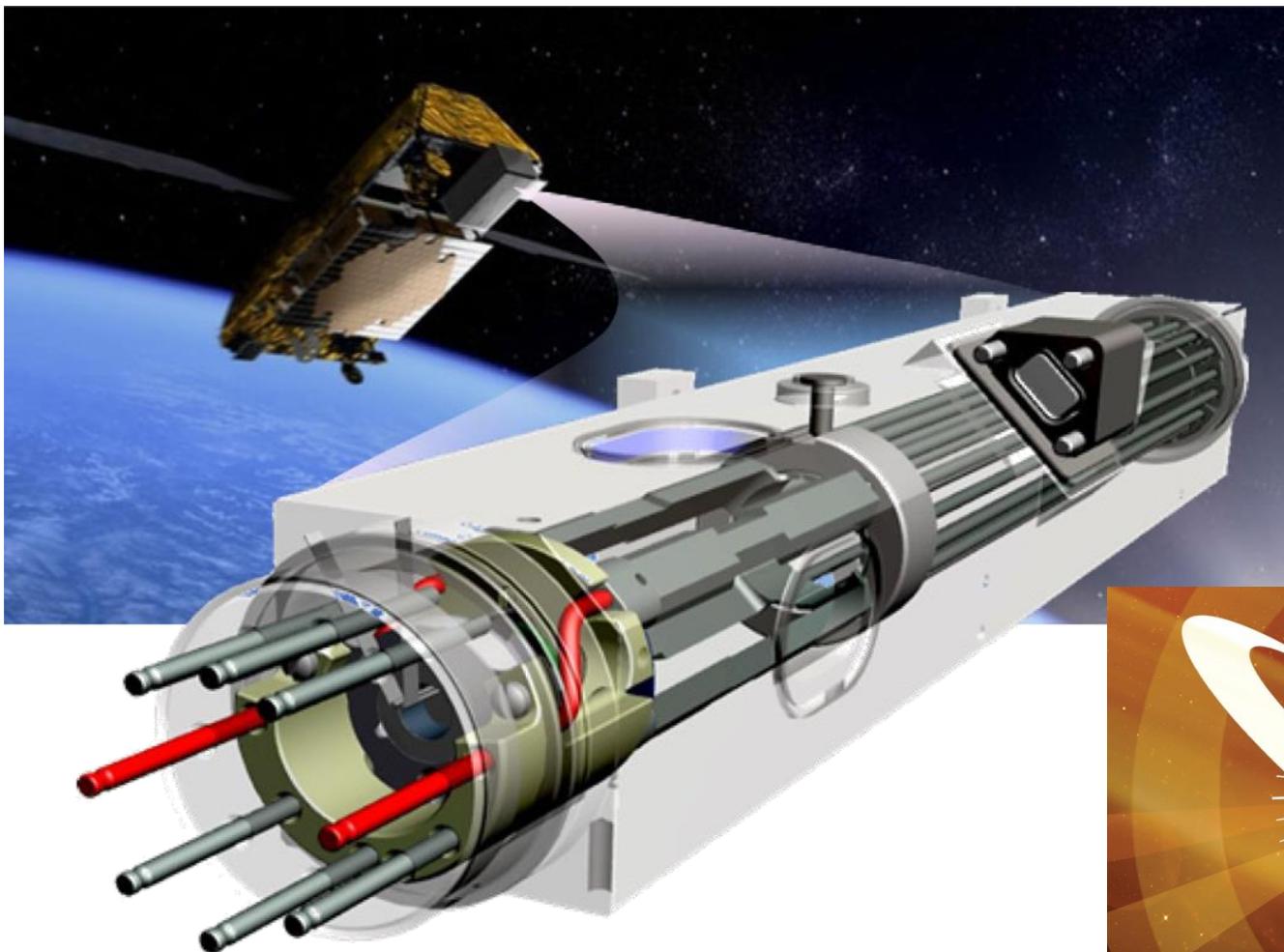
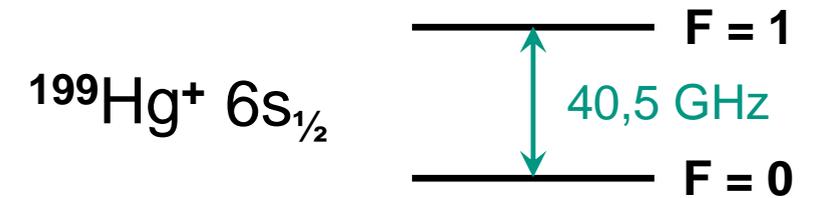
- die Frequenz des Hyperfeinstruktur-Übergangs von **Cs-133** ist ein idealer Standard für ultra-präzise Atomuhren
- Test der speziellen Relativitätstheorie auf einem Level von **$1:10^8$**
- keine Abweichungen entdeckt, Herr Einstein!



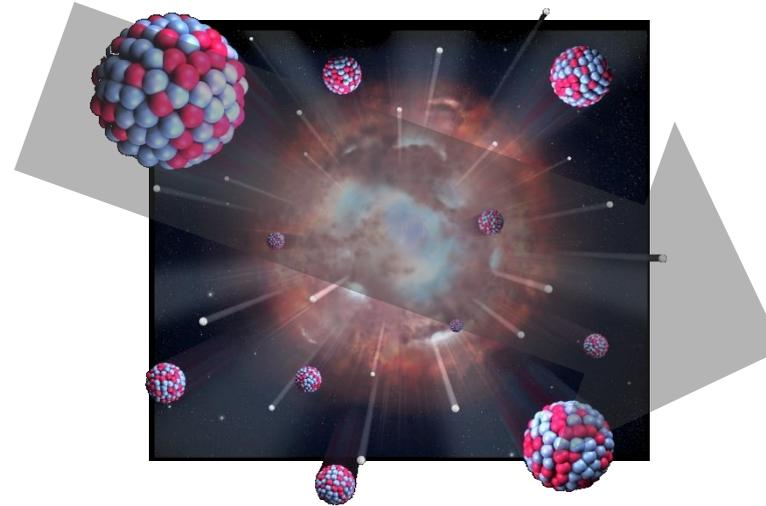
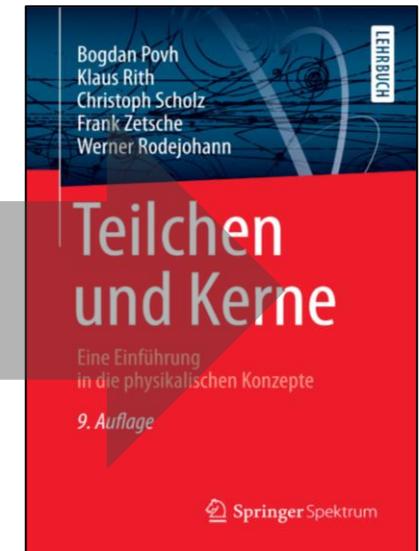
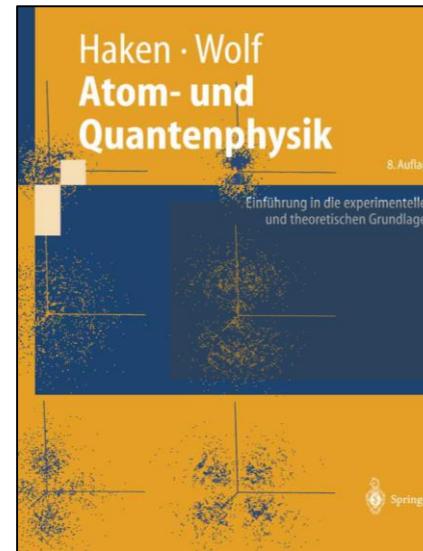
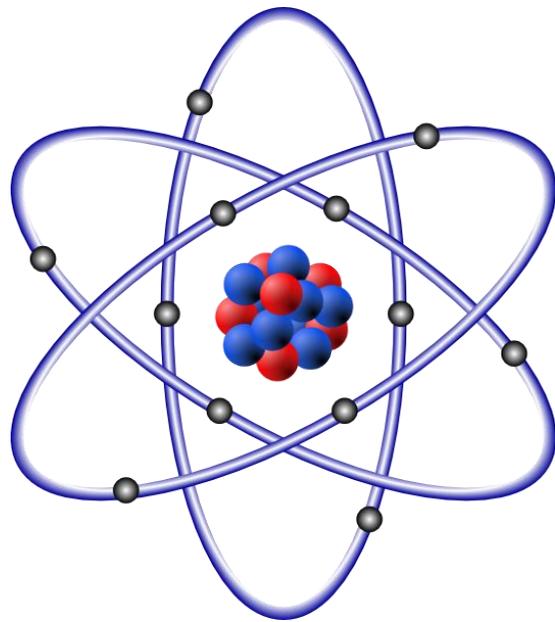
Atome: Frequenzmessung 2

■ Deep Space Atomic Clock: (DSAC)

- miniaturisierte, ultra-präzise Atomuhr, basierend auf Hg^+ - Ionen
- Hyperfein-Übergang bei 40,5 GHz



Bye-bye Atome, hello Kerne



bye...bye

