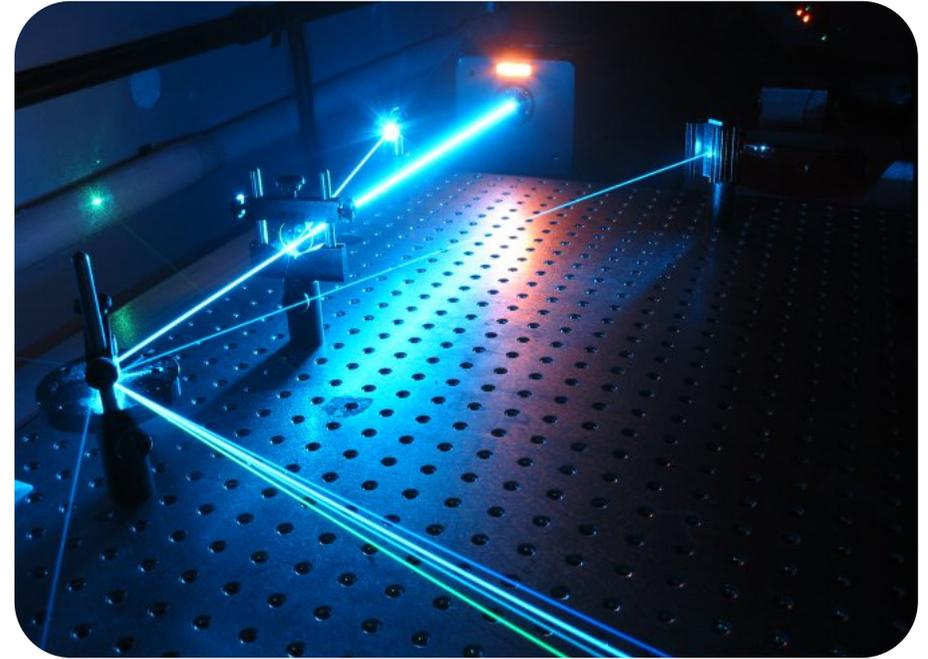


# Atome & Kerne

Sommersemester 2024

Vorlesung # 17, 25.06.24



Thomas Müller, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

## 9. Atome & Strahlungsprozesse

### 9.3 Maser und Laser

He-Ne-Laser

Rubin-Laser

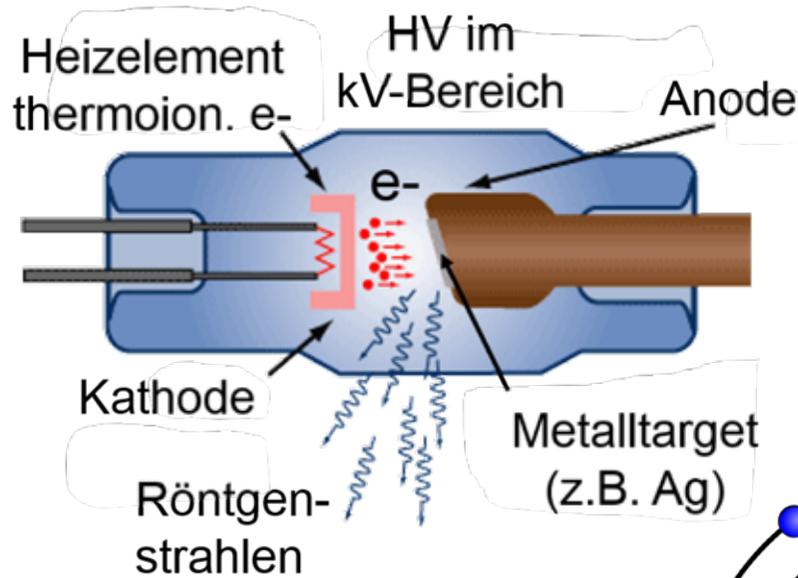
Anwendungen



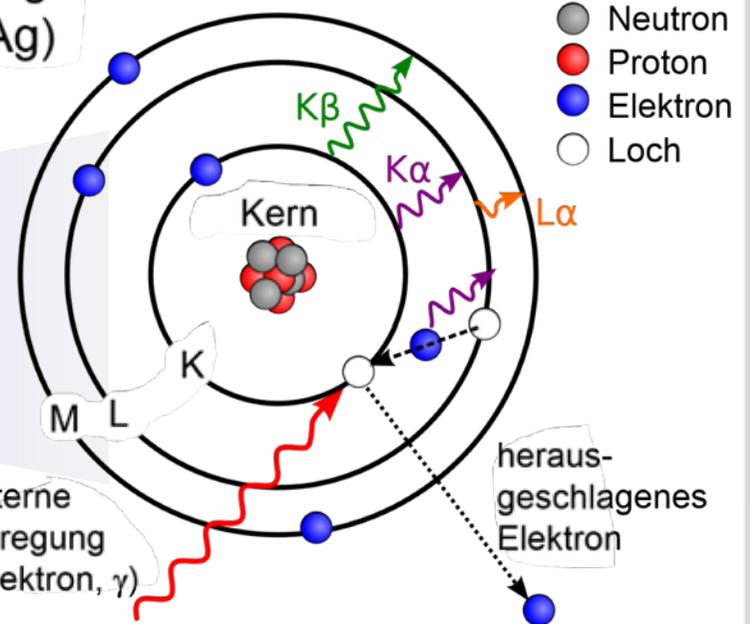
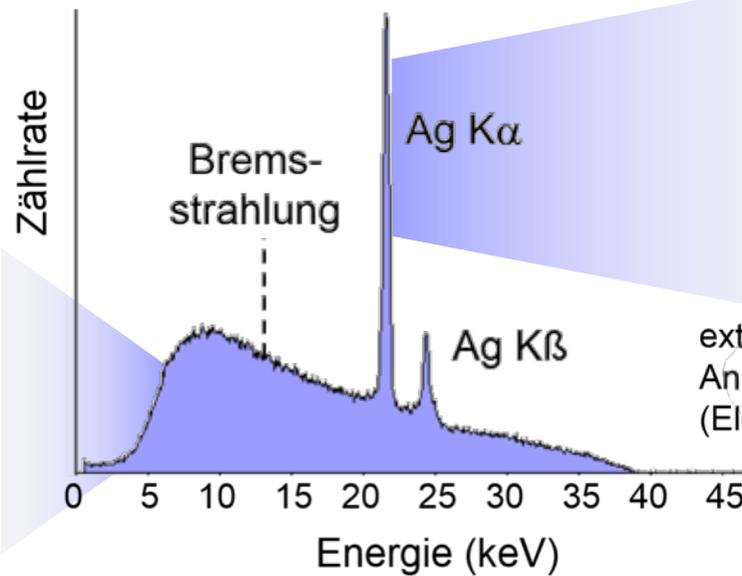
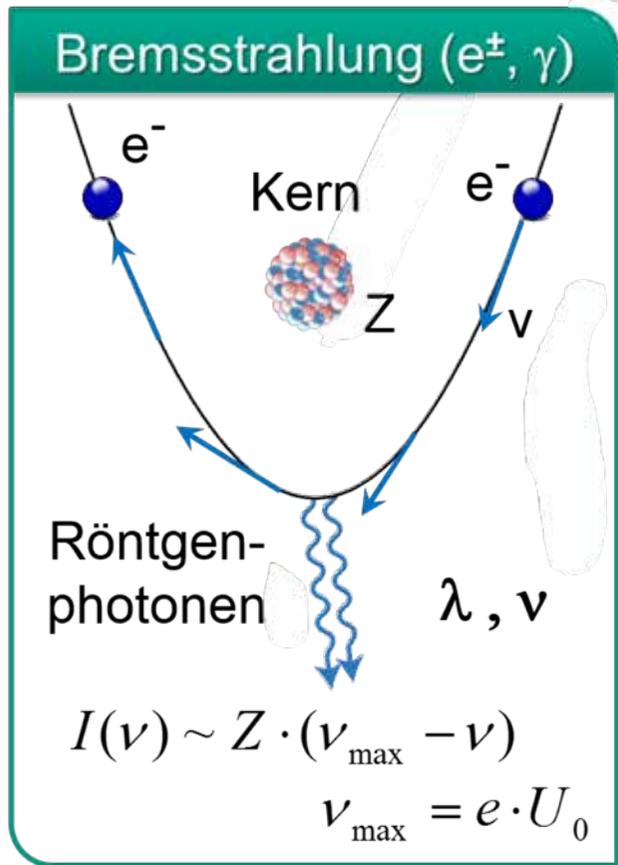
# Wh.: Röntgenstrahlung - Grundlagen

## X-Rays:

Energien im multi-keV-Bereich



Charakteristische Strahlung

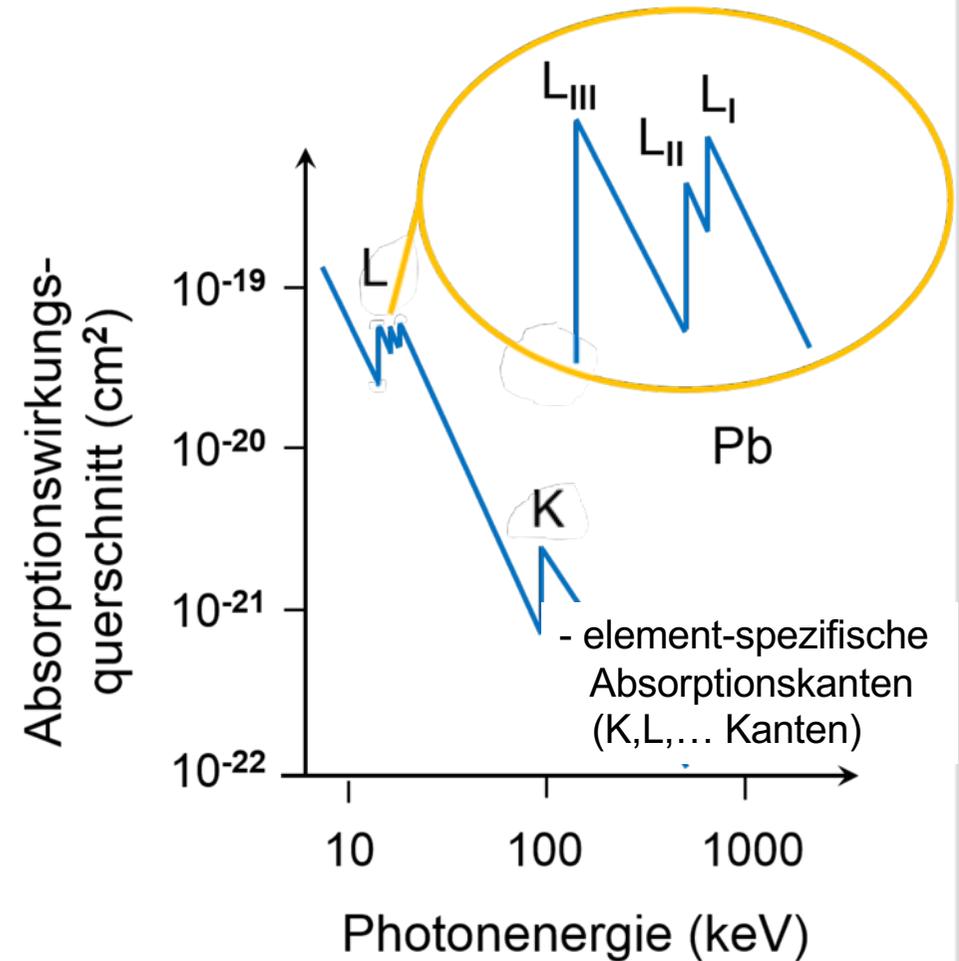
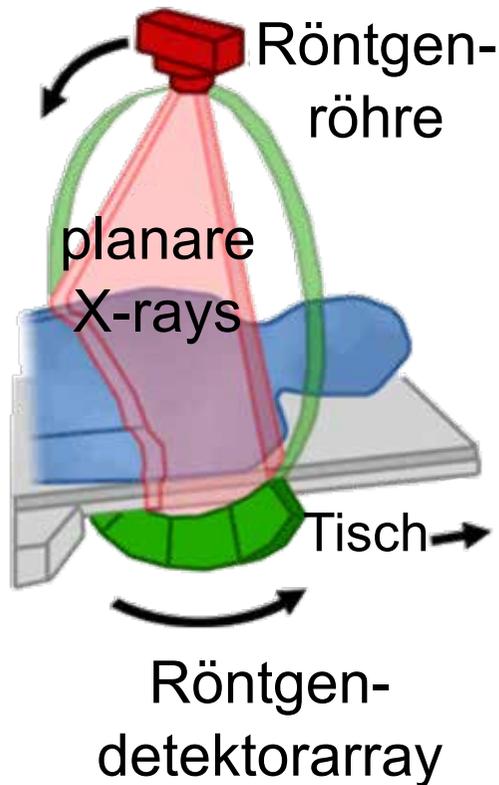


# Wh.: Röntgenstrahlung – Transmission

- Beim Durchtritt durch Materie wird **Röntgen- ( $\gamma$ -) Strahlung** durch Photo-Absorption **exponentiell abgeschwächt**:

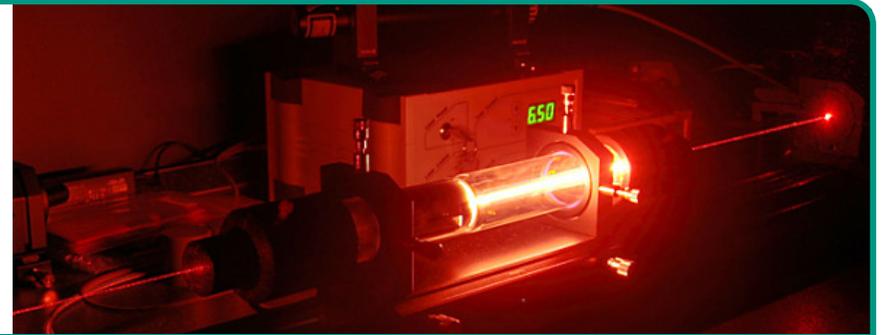
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$$

$\mu$ : Massen-Absorptions-Koeffizient



# 9.4 Maser und Laser

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



## ■ Eigenschaften von Laserlicht

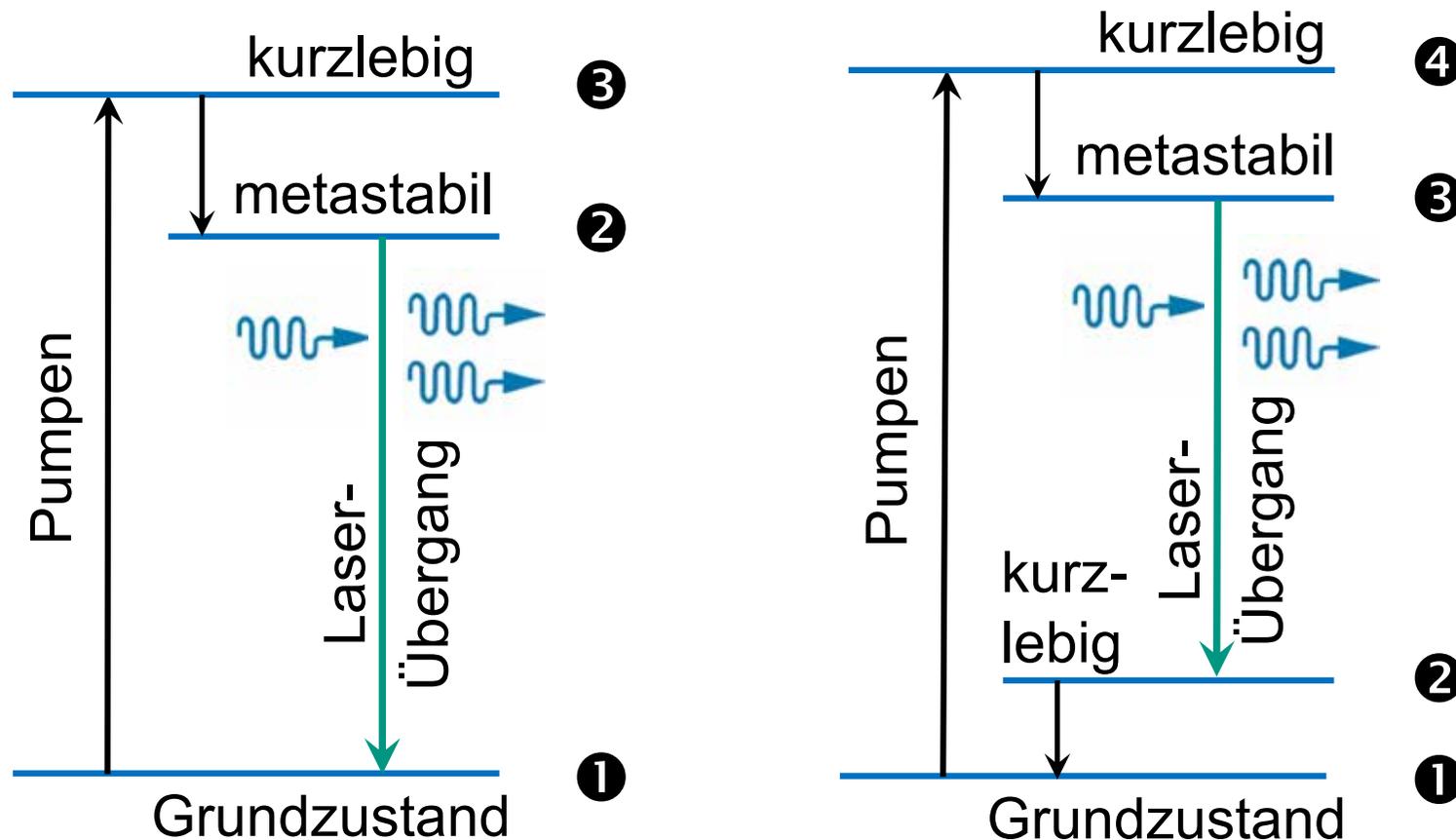
- **kohärente Emission** (große Kohärenzlänge)
- **monochromatisch** (extrem enger Frequenzbereich)
- verfügbare Wellenlängen:  
..., Mikrowellen (Maser), IR, optisch, UV, Röntgen,...
- kontinuierlicher Dauerbetrieb (cw) bis hin zu extrem kurzen Strahlpulsen (femto-s, atto-s)
- hohe Wiederholfrequenz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

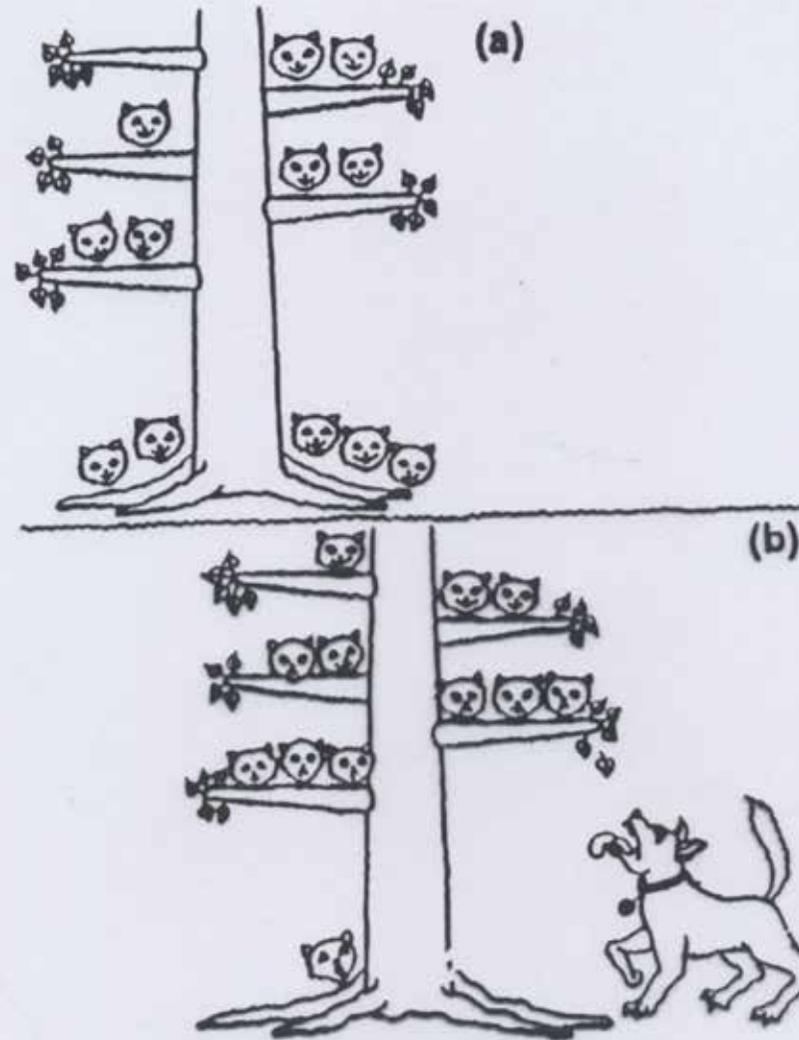


# Laser – Grundprinzip

## ■ 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



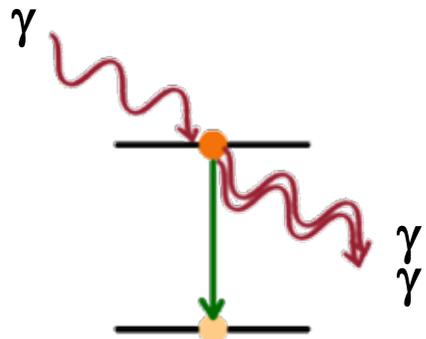


“Schematic of a population inversion. (a) Without an external driving force, the particles (cats) are distributed in the lower-lying energy levels (branches) according to the Boltzmann distributions. (b) With external pumping of energy (dog), the particles populate higher energy states (higher branches) more than lower ones. Lasing action may be likened to an upper branch breaking, returning its occupants to their ground state in a

S. 270.1513

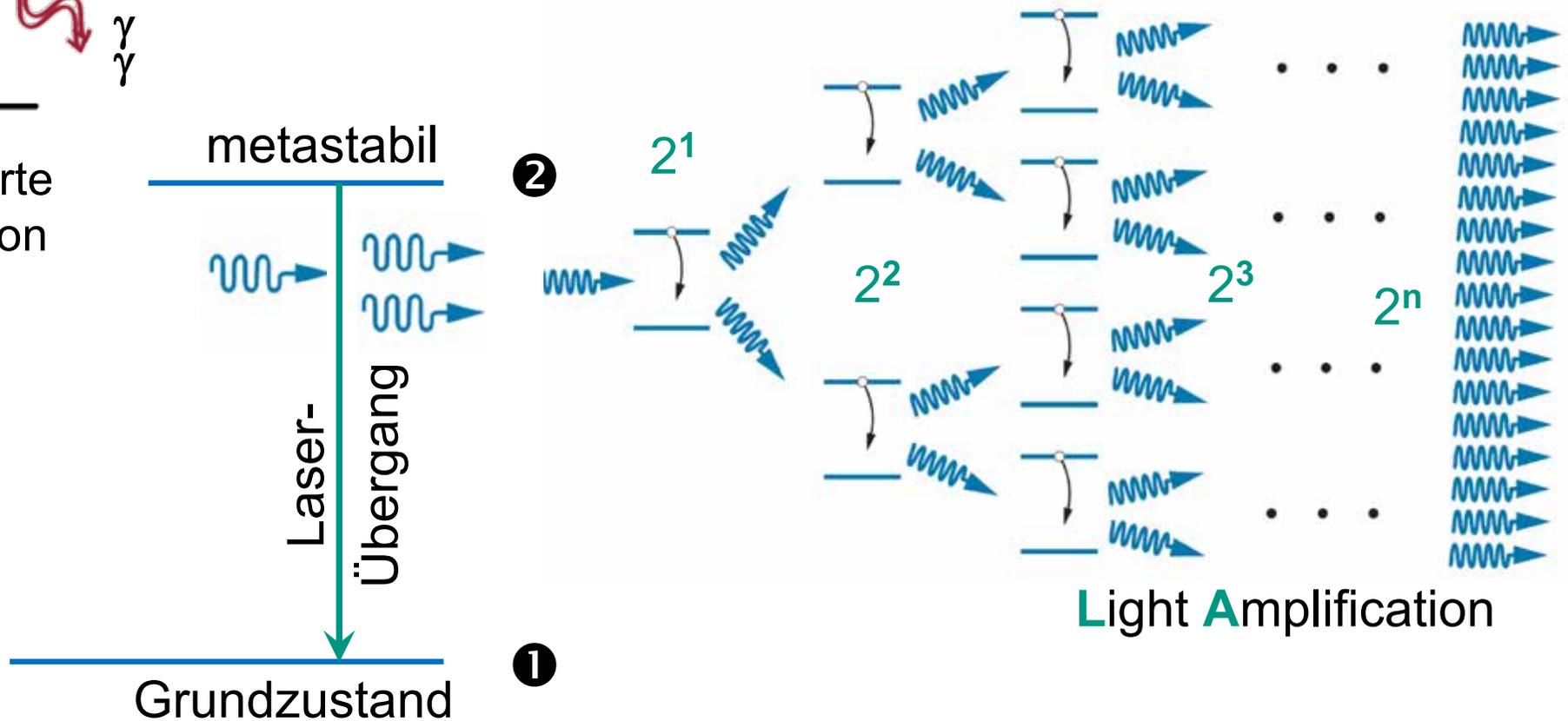
# Laser – stimulierte Emission

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



stimulierte Emission

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



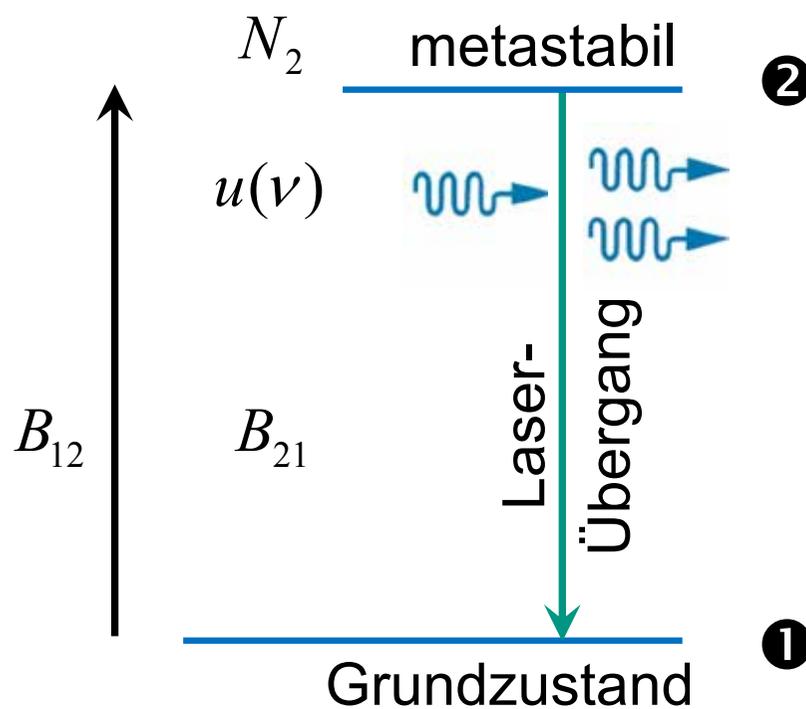
# Laser – stimulierte Emission

■ **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

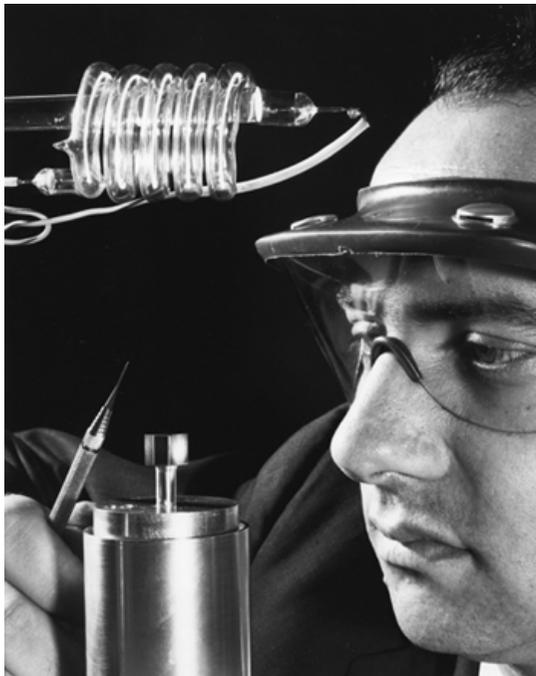
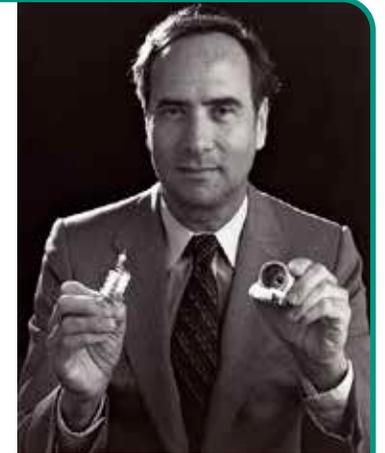
- Einstein:  $B_{21} = B_{12}$  (Absorption),  
**Übergangsrate  $E_2 \rightarrow E_1$  daher**

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

**Besetzungsinversion!**

# 1. 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”*



## United States Patent Office

3,353,115

Patented Nov. 14, 1967

1

3,353,115

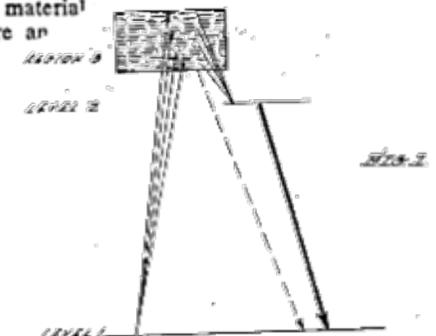
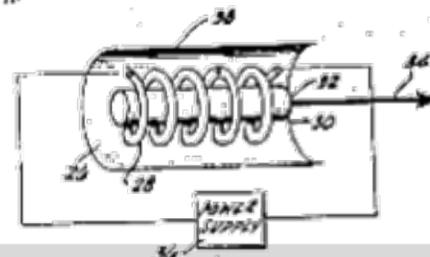
### RUBY LASER SYSTEMS

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  $5 \times 10^{10}$  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 of the low density gaseous material

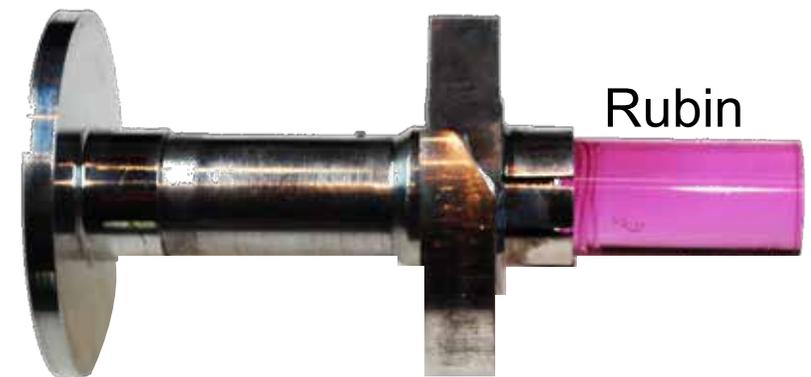
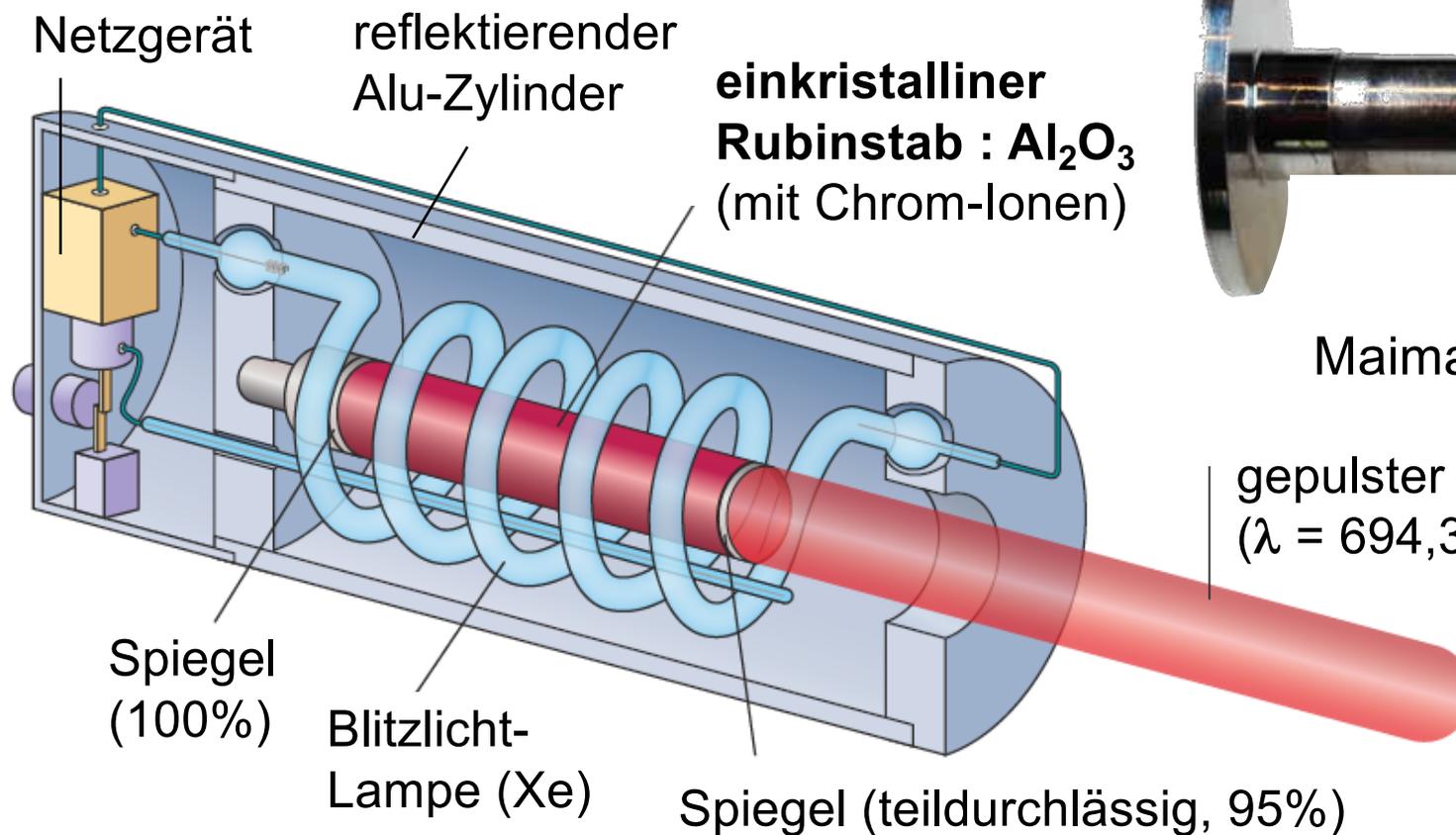
It is therefore an object of the present invention to provide a laser system in which the frequency of operation is effectively tuned by Stark or Zeeman effects.



# 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

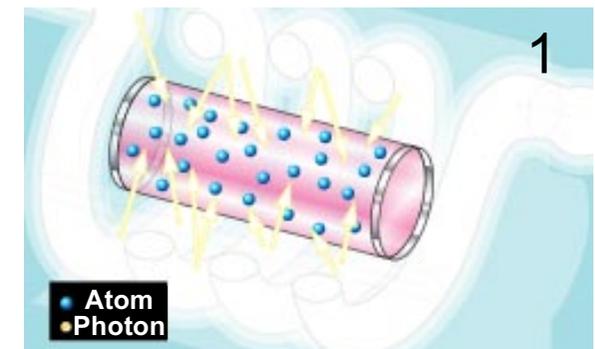
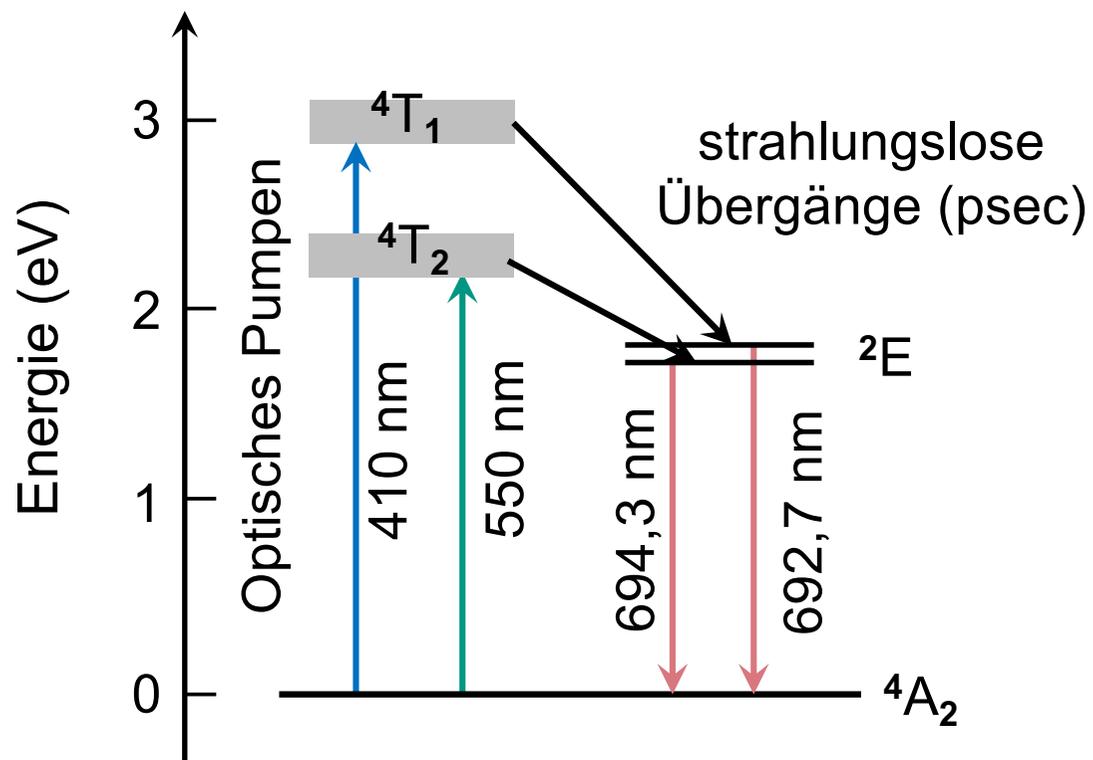
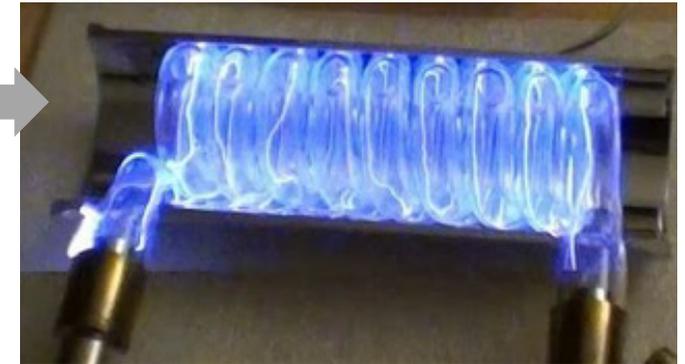


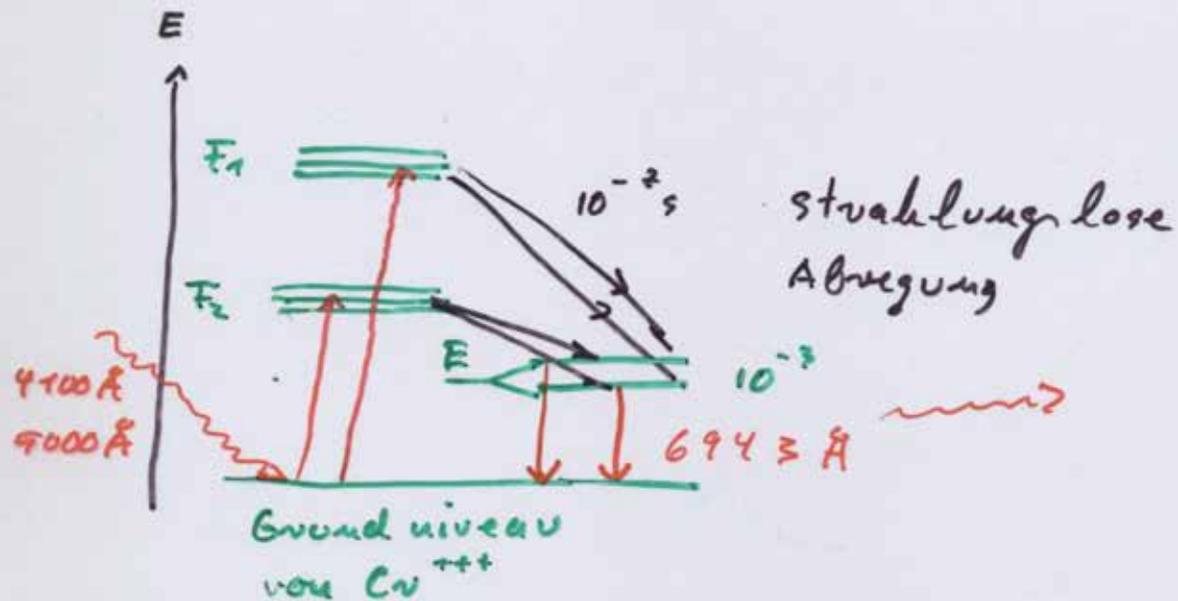
Maiman's originaler Laser

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

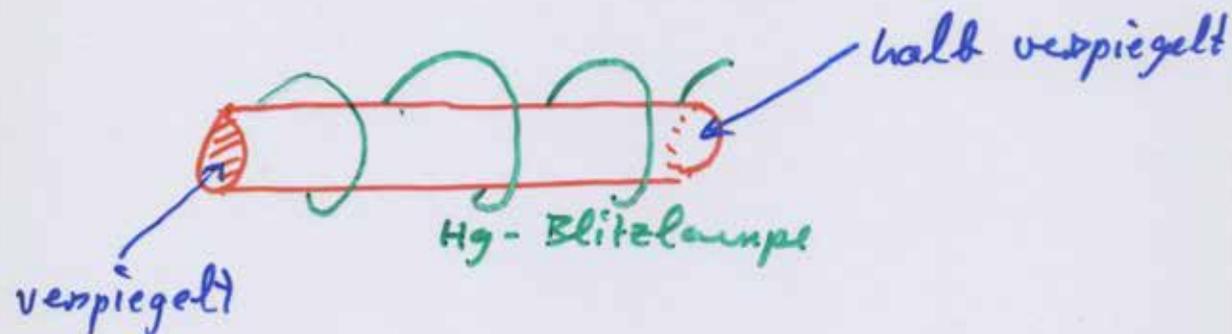
## ■ Grundlagen eines Rubin-Lasers:

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



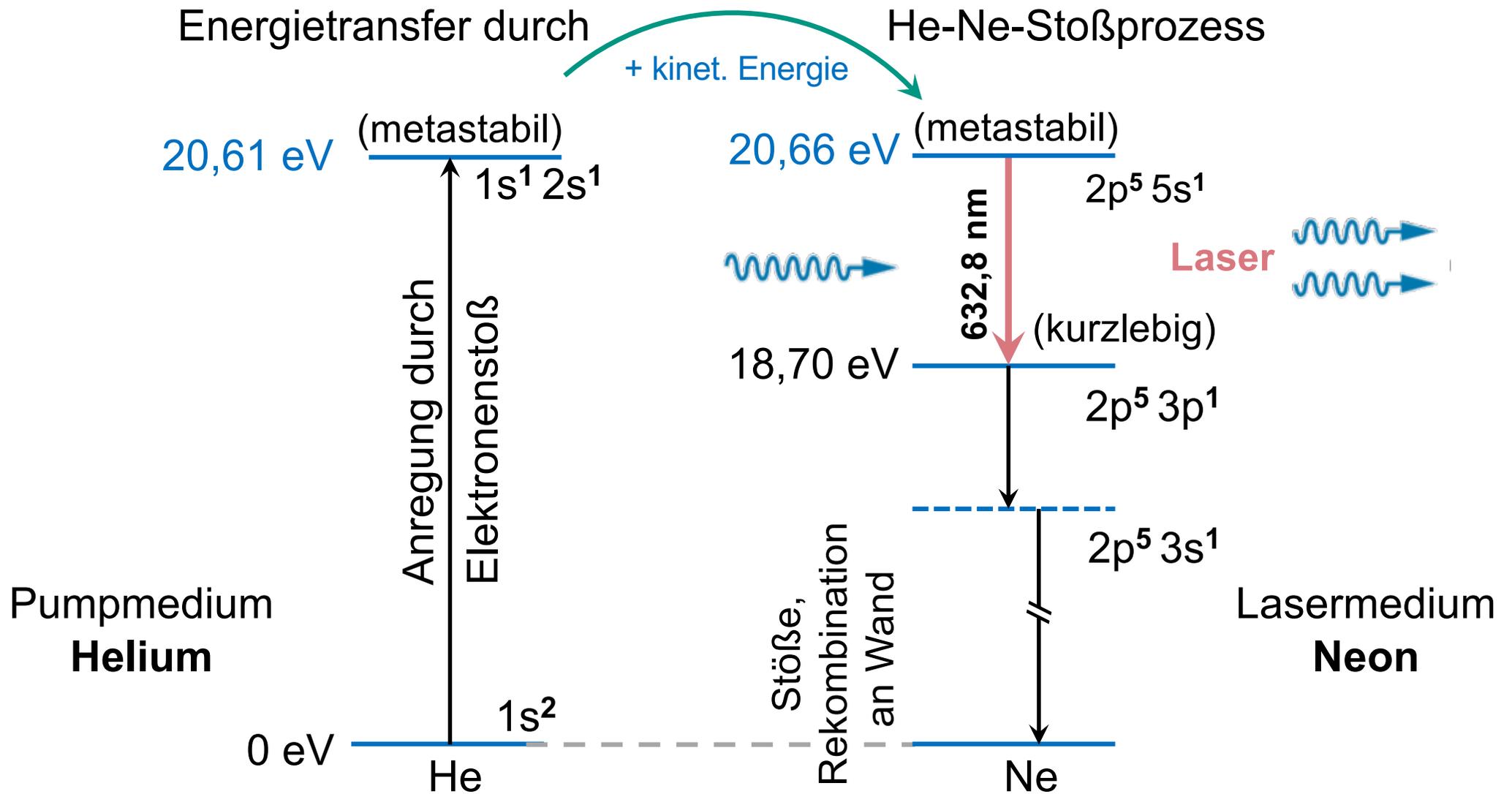


- \* Hg - Blitzlicht = Pumpen in die  $F_1, F_2$  - Bänder des  $\text{Cu}^{3+}$
- \* Schneller Übergang in das  $E$  - Niveau
- \* Hohe Lebensdauer des  $E$  - Zustandes erlaubt induzierte Emission



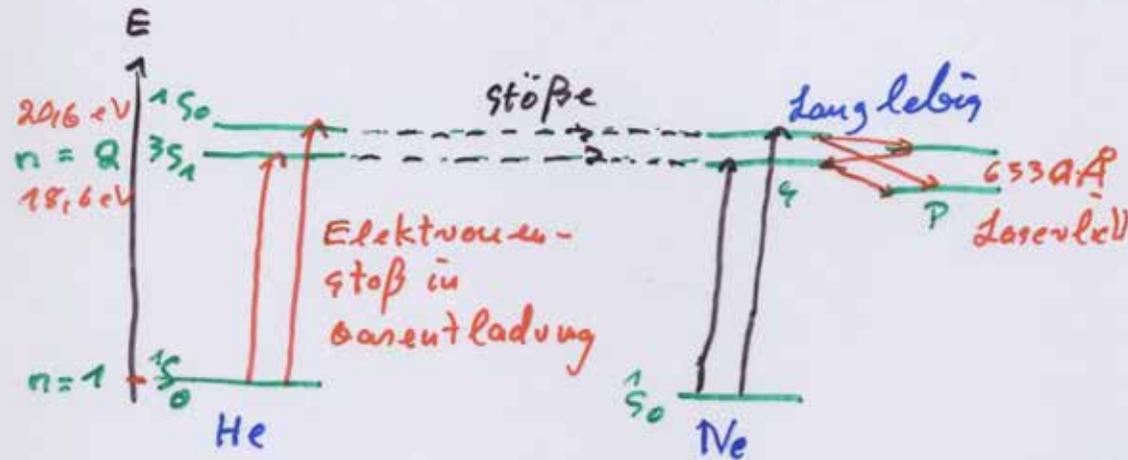
# 2. Helium-Neon-Laser – Schema

## ■ Termschema eines He-Ne-Lasers:

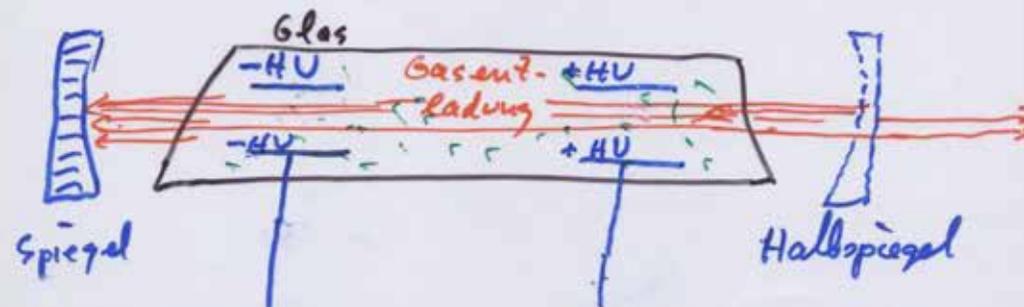


# b) He-Ne-Laser

(Ähnlich auch  
CO<sub>2</sub>-N-Laser)

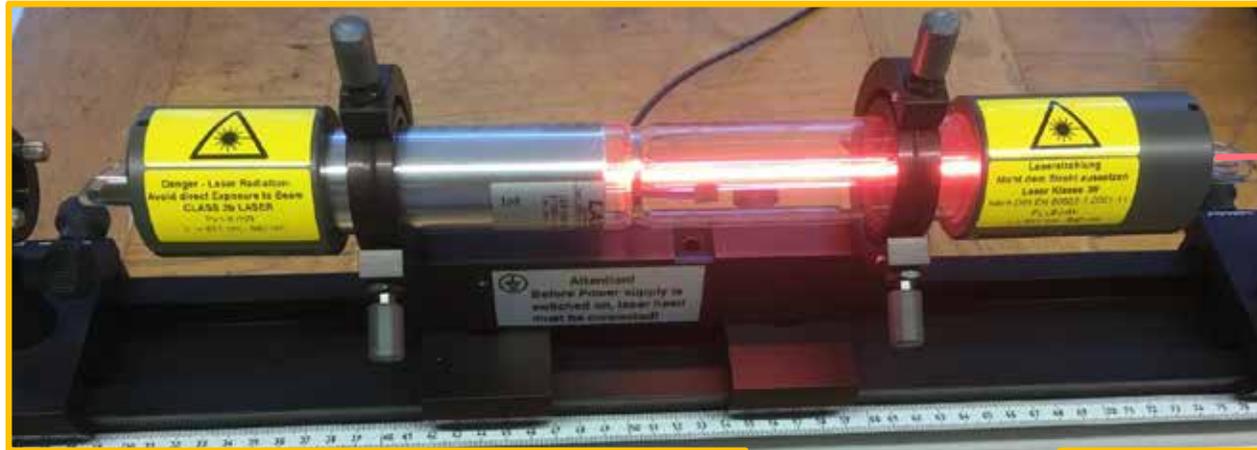


- \* Anregung des He durch Gasentladung
- \* Stoßanregung des Ne durch angeregtes He : ähnl. Energieniveaus
- \* Emission von  $\gamma$ , Übergang in P-Zustand



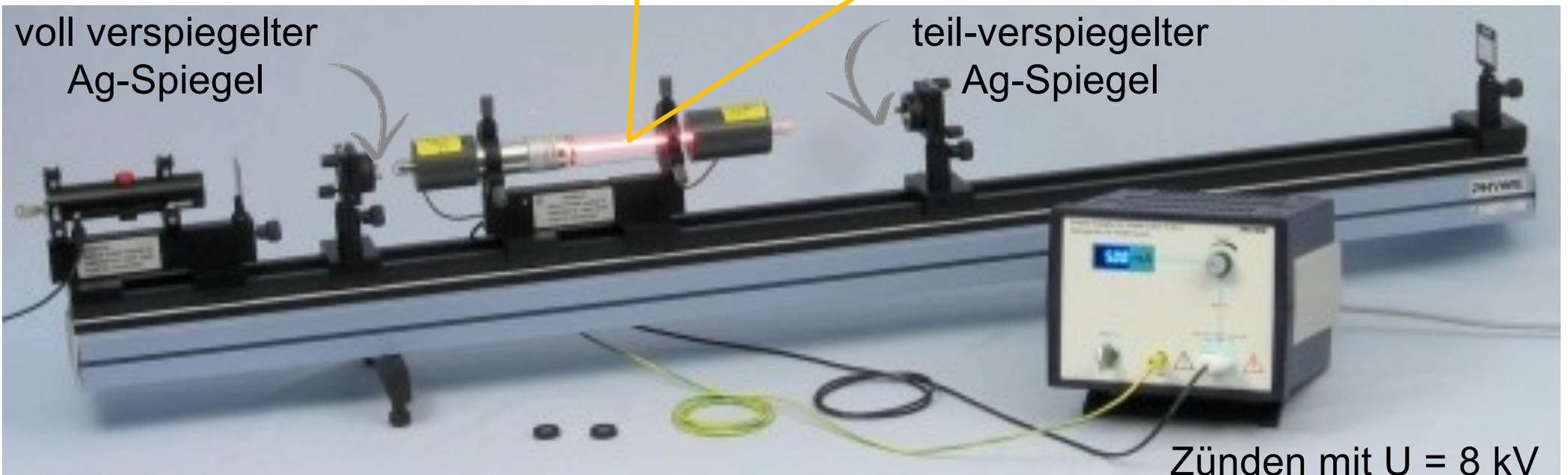
# Helium-Neon-Laser – Experiment

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



632,8 nm

Leistung < 8 mW



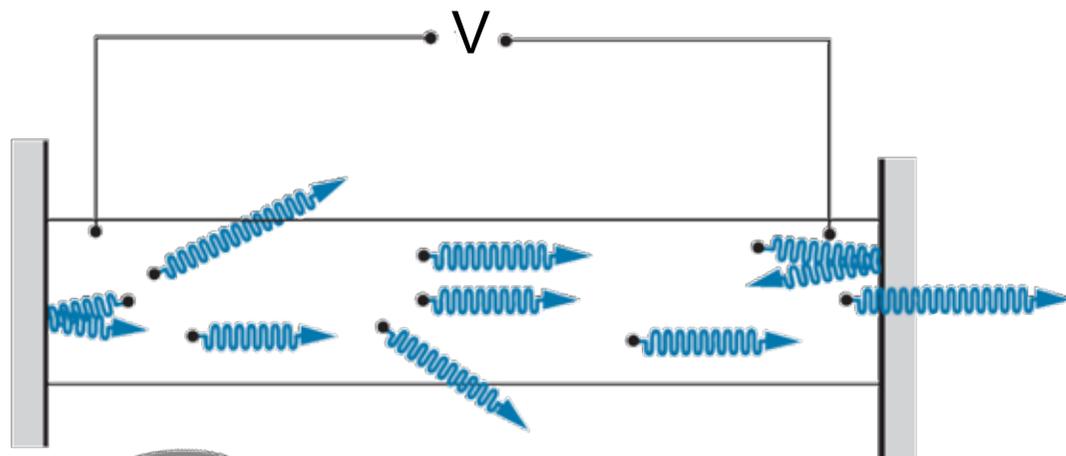
voll verspiegelter  
Ag-Spiegel

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

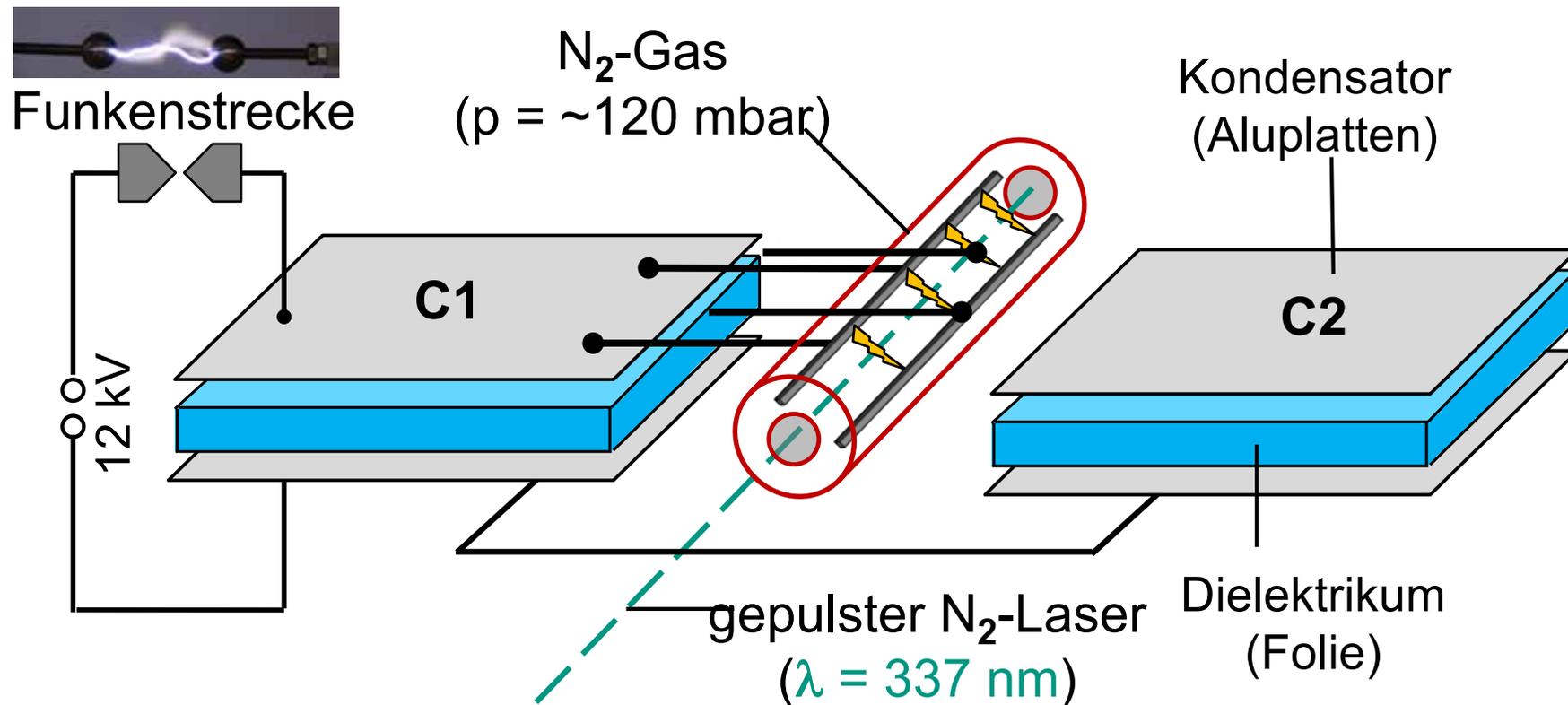


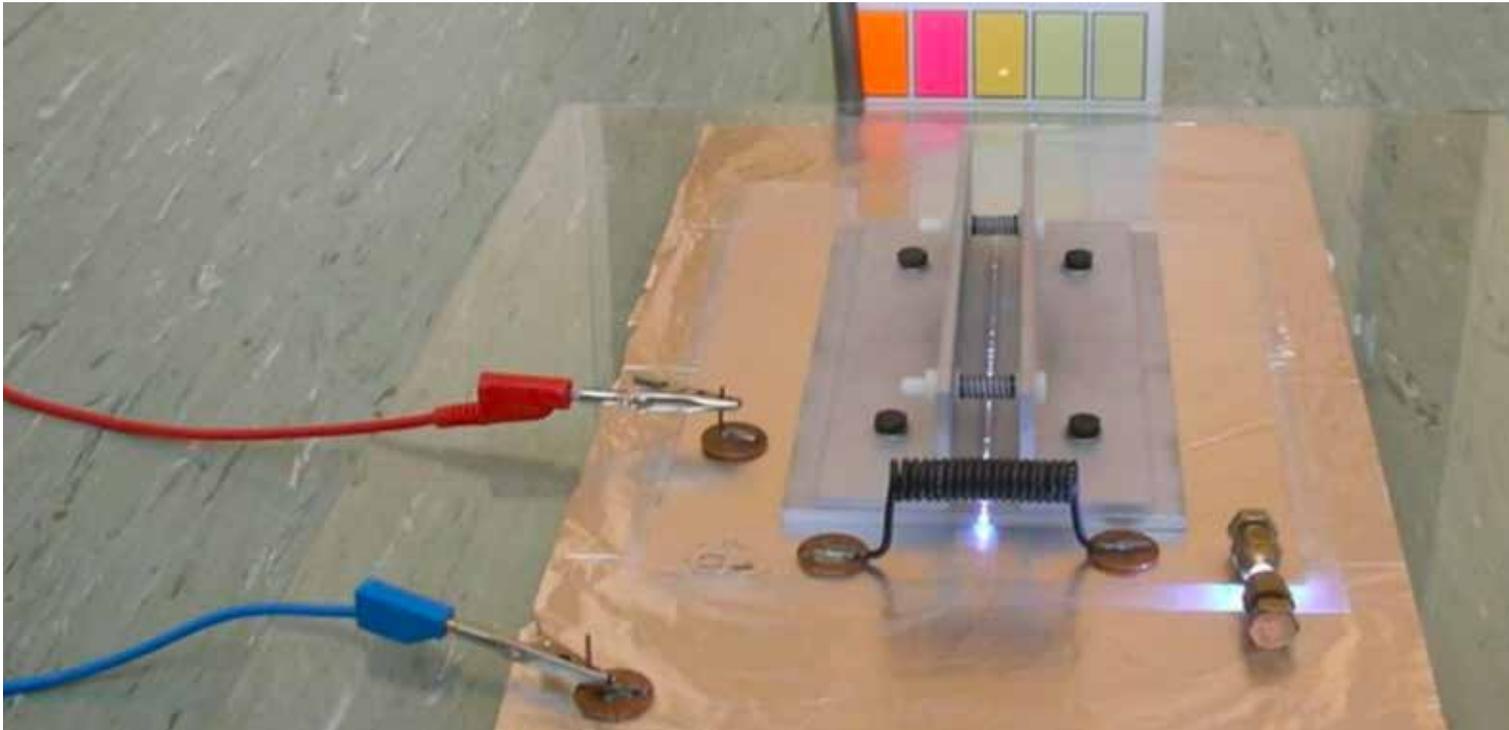
- **cw** (kontinuierlicher) Betrieb
- ohne Brewster-Fenster keine präferierte Polarisationssebene



# 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.





Kein Pumpen nötig: „Superstrahler“

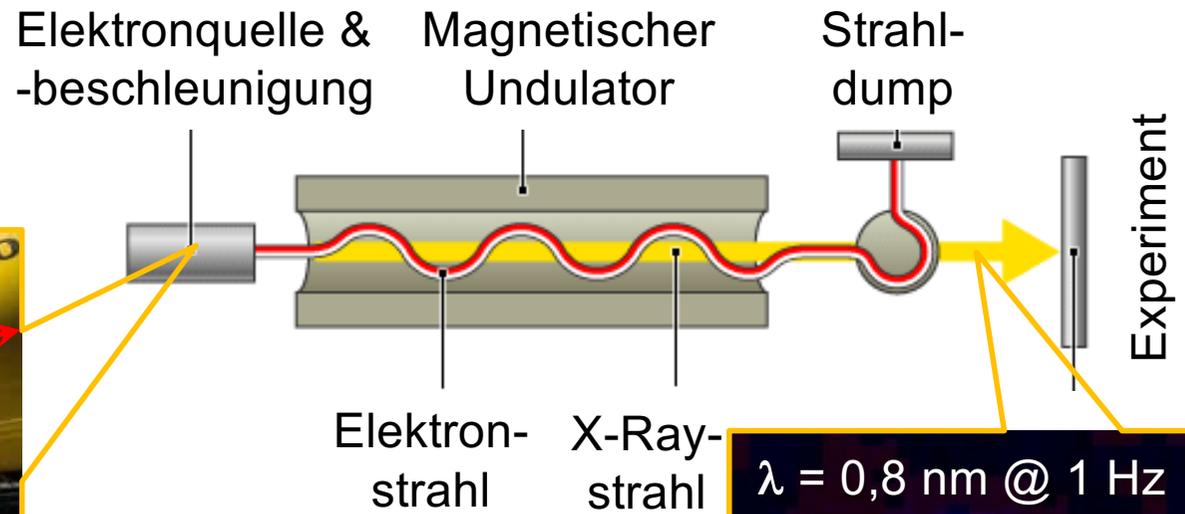
**CHARACTERISTICS OF TYPICAL LASERS**

GAIN MEDIUM	PEAK POWER	PULSE LENGTH	WAVELENGTH	USES
<b>Gas</b>				
HeNe	1 mW	cw	633 nm	Supermarket scanners
Argon	10 W	cw	488 nm	Entertainment, medical
CO <sub>2</sub>	200 W	cw	10.6 μm	Cutting and welding
CO <sub>2</sub> TEA	5 MW	20 ns	10.6 μm	Heat treating
<b>Semiconductor</b>				
GaAs	5 mW	cw	840 nm	CD players
AlGaAs	50 mW	Modulated	760 nm	Laser printers
GaInAsP	20 mW	Modulated	1.3 μm	Fiber communications
<b>Solid state</b>				
Ruby	100 MW	10 ns	694 nm	Live holography
Nd:YAG	50 W	cw	1.06 μm	Semiconductor processing
Nd:YAG (QS)	50 MW	20 ns	1.06 μm	Medical applications
Nd:YAG (ML)	2 kW	60 ps	1.06 μm	Short-pulse studies
Nd:Glass	100 TW	11 ps	1.06 μm	Laser fusion
<b>Dye</b>				
Ring dye	100 mW	Continuous	Tunable	Spectroscopy
Rh6G (ML)	10 kW	10 fs	600 nm	Scientific studies
<b>Chemical</b>				
HF	50 MW	50 ns	3 μm	Weapons
<b>Excimer</b>				
ArF	10 MW	20 ns	193 nm	Materials processing
XeCl	50 kW	10 ns	375 nm	Medical applications

# 3. 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  $\Delta t < 100 \text{ fs}$

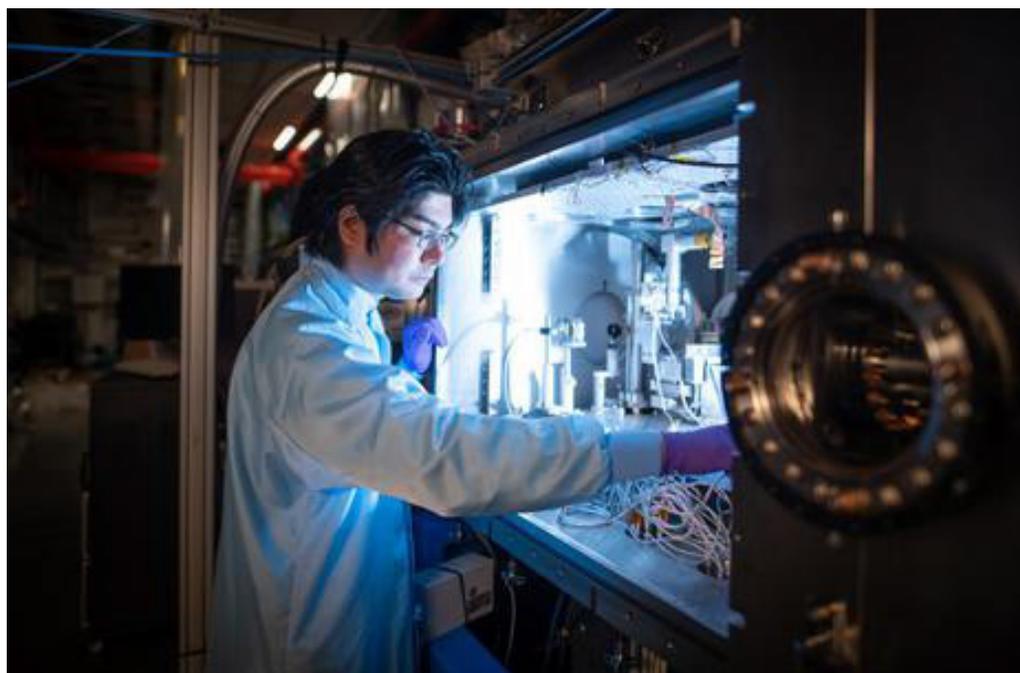
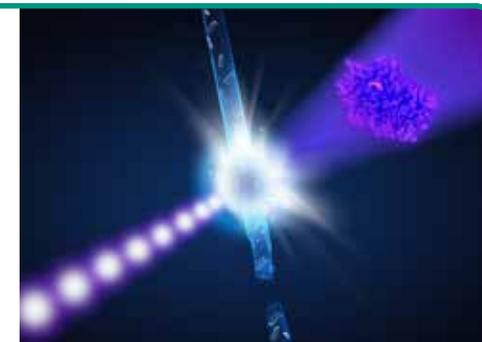


Superstrahler



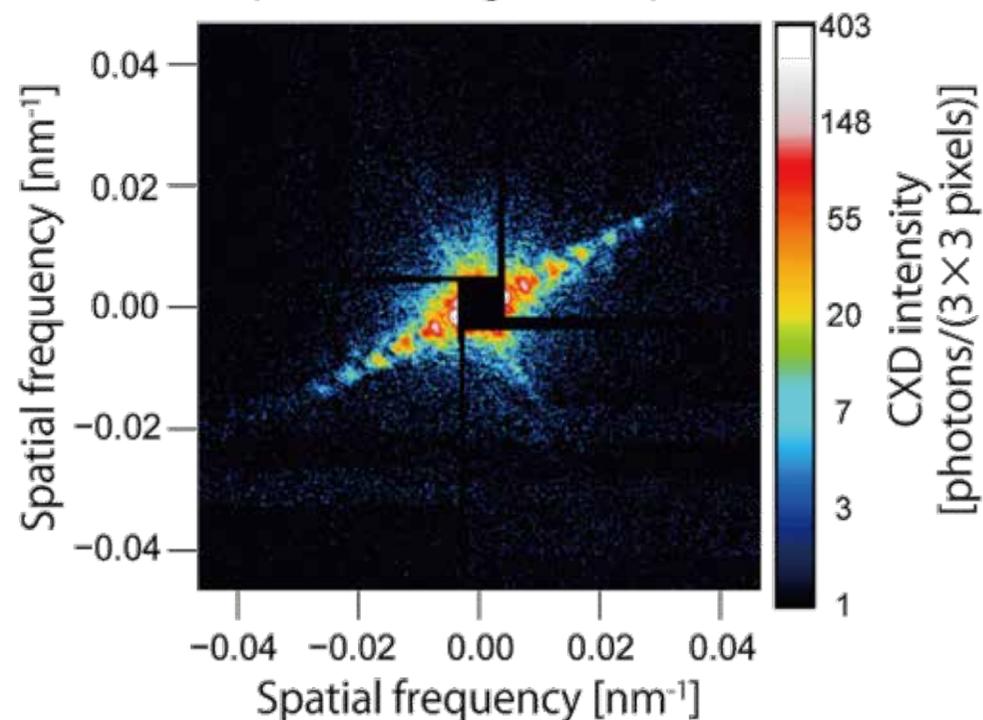
## ■ XFEL: X-Ray Free-Electron Laser

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

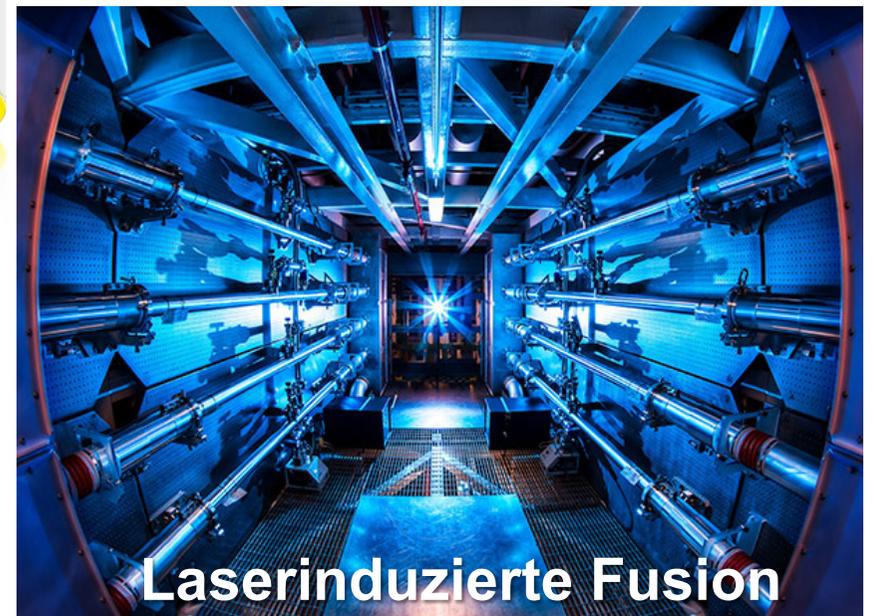
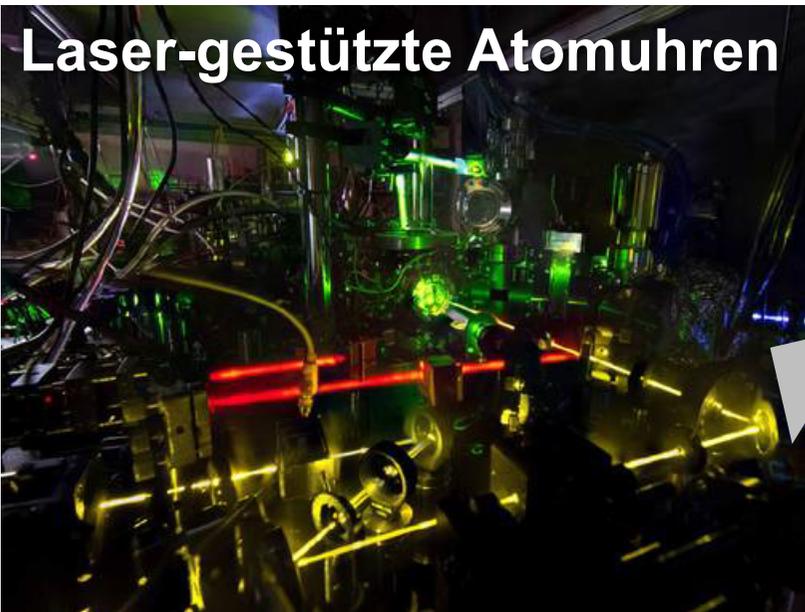


Präparationsarbeiten an Probenkammer

CXD pattern from a living cell exposed to single XFEL pulse



# 4. Laser – Anwendungen

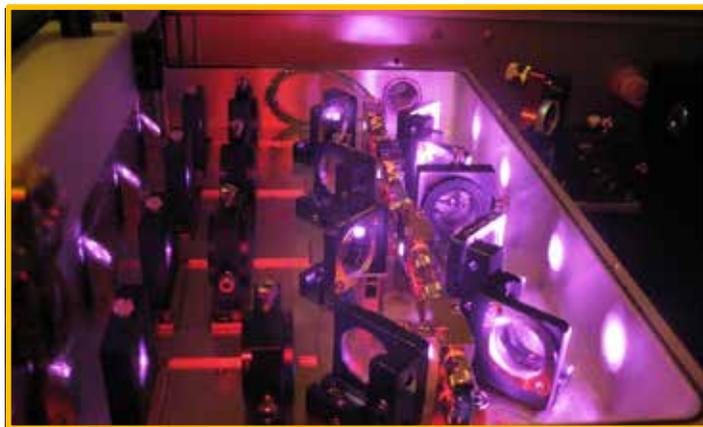
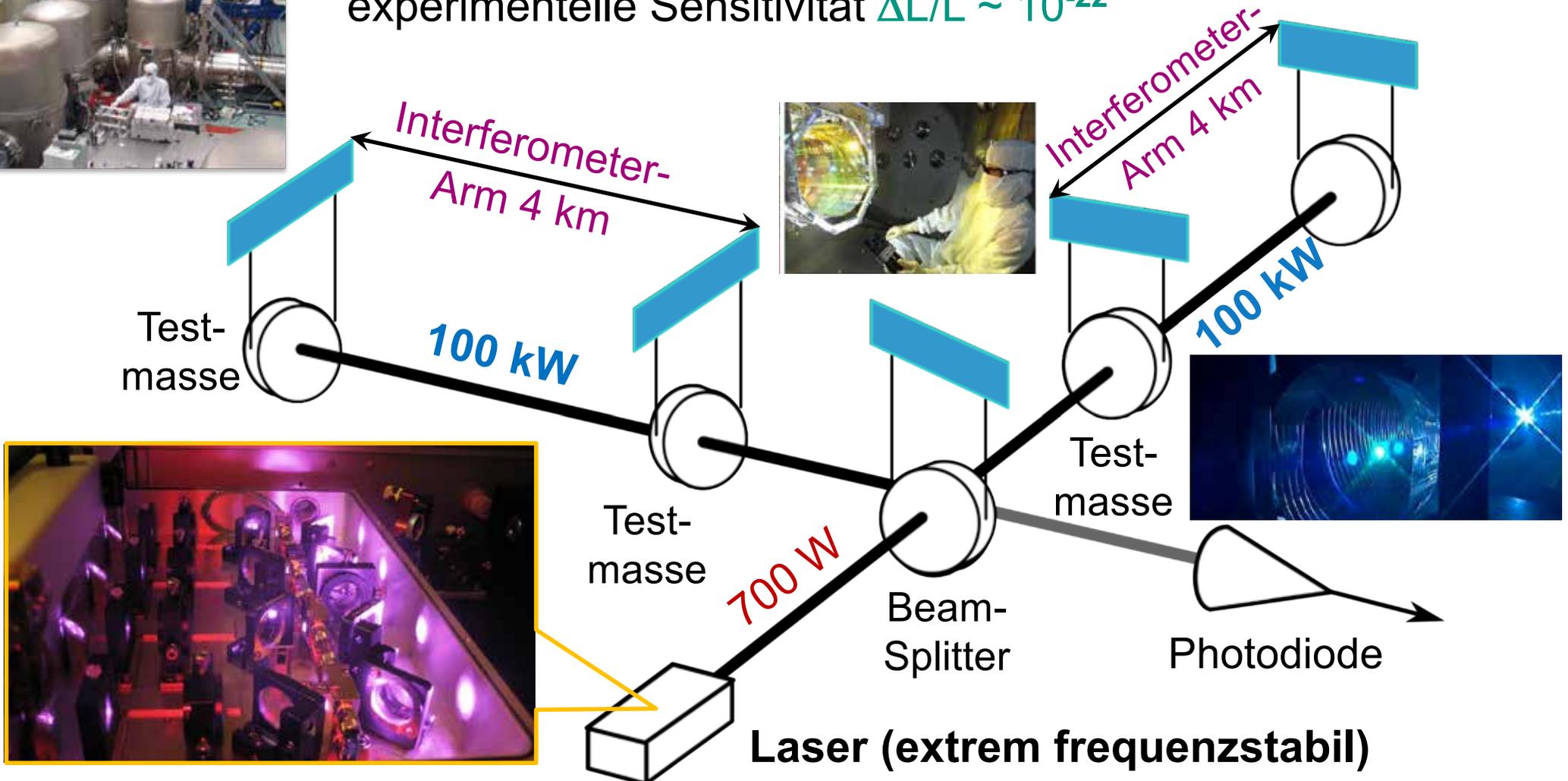


# Laserinterferometer für Gravitationswellen

## ■ Laser-basierte Interferometer zum Nachweis von Gravitationswellen

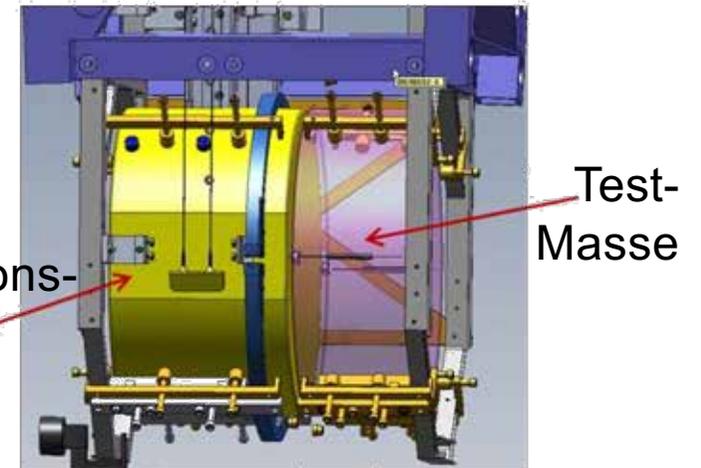
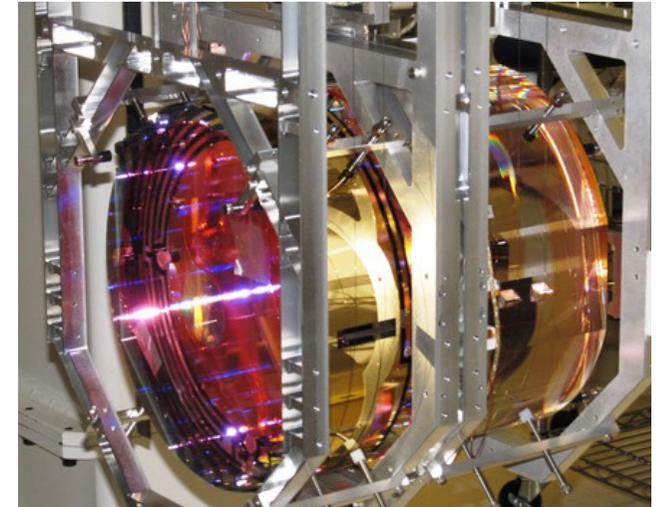
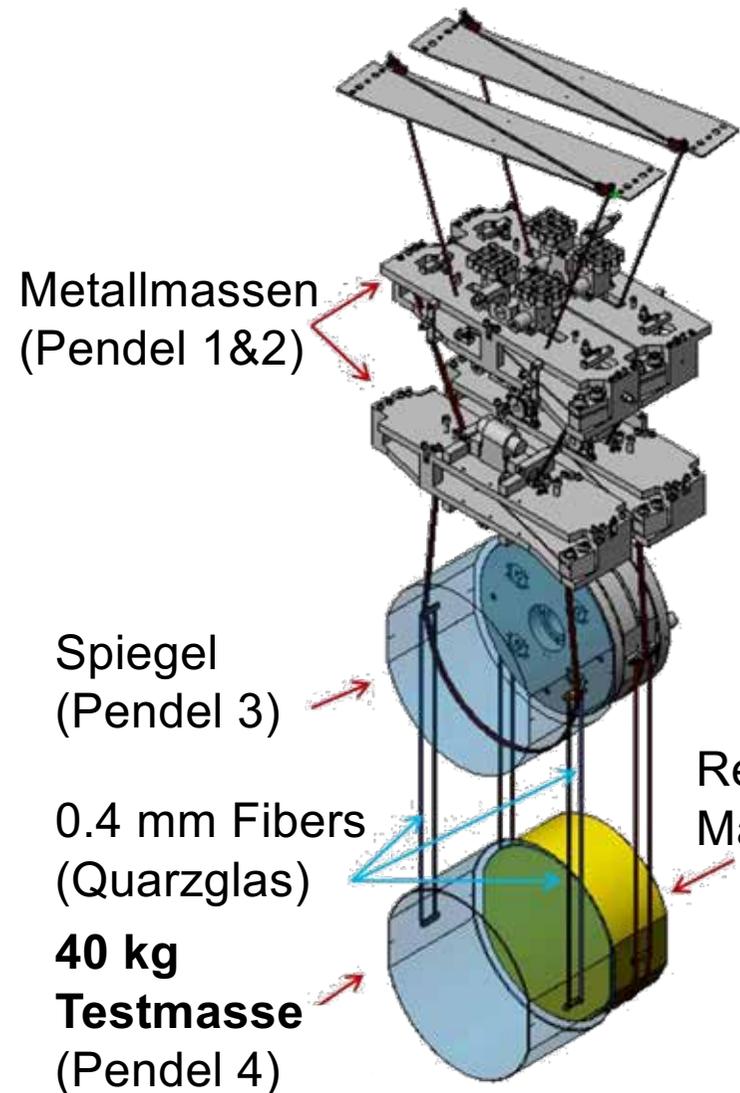
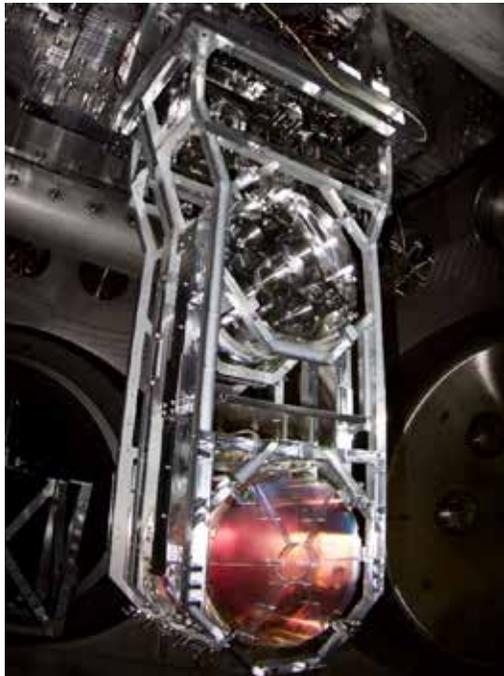


experimentelle Sensitivität  $\Delta L/L \sim 10^{-22}$



# Experimentelle Techniken – Aufhängung

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



# 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



# LIGO Resultate: GW150914

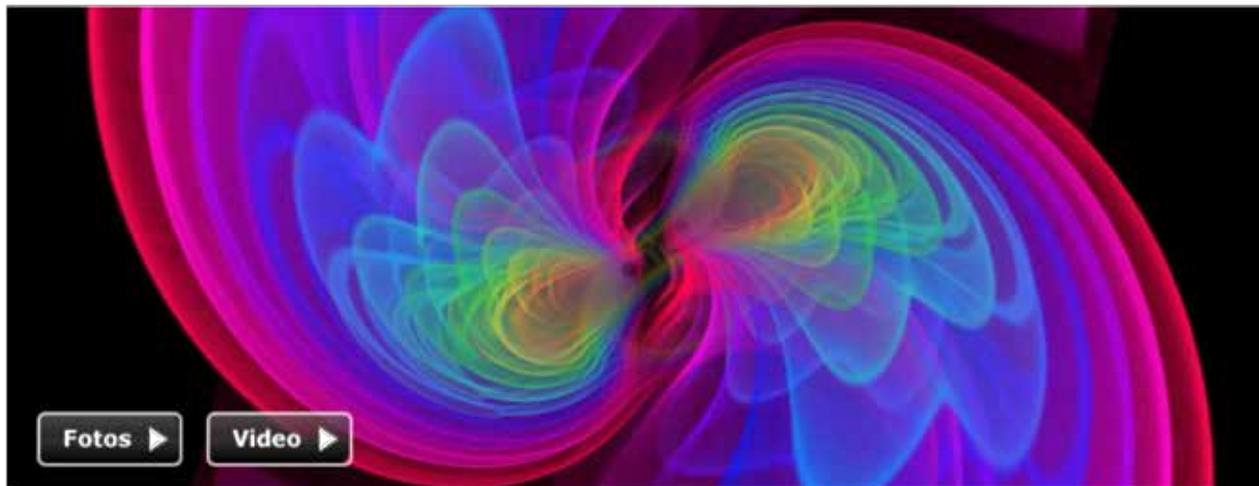
14.9.2015 09:50:45 UT

- 11.2.2016: Veröffentlichung des ersten GW-Nachweises (LIGO) mit Signifikanz  $5.1 \sigma$  aus der Verschmelzung von 2 stellaren Black Holes



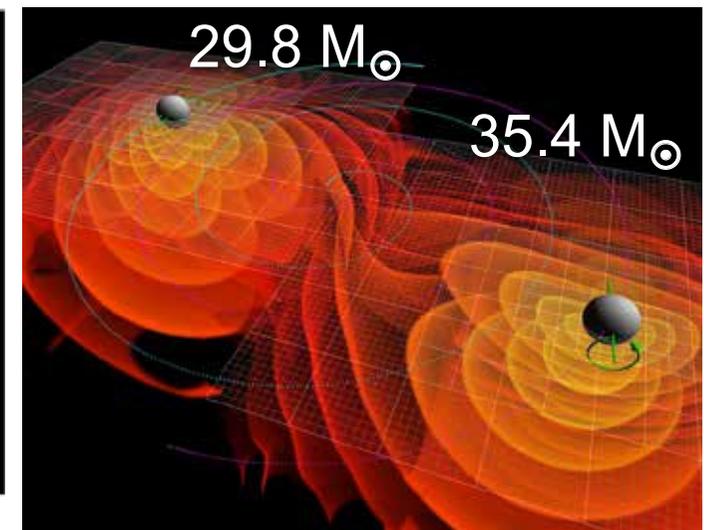
Revolutionäre Entdeckung

Physiker messen erstmals Gravitationswellen



Es ist eine Jahrtausendsensation: 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 ]

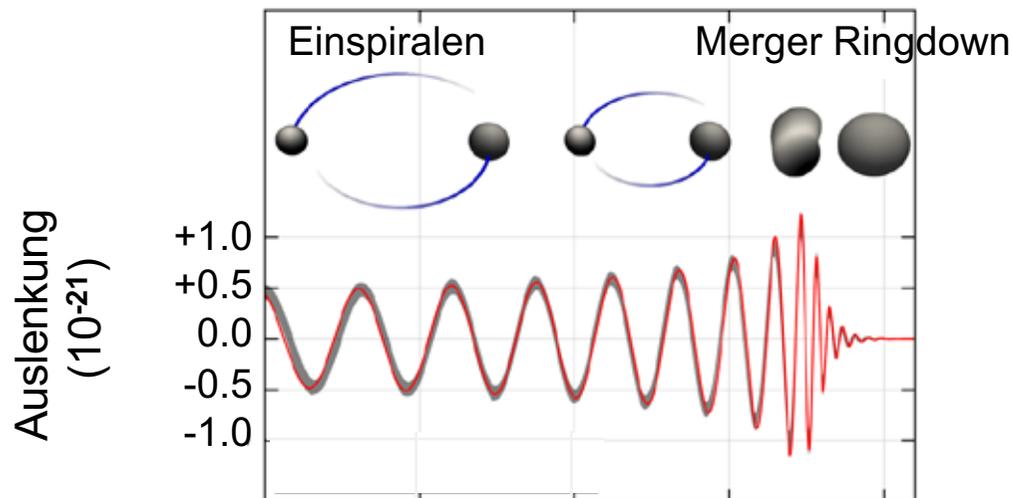
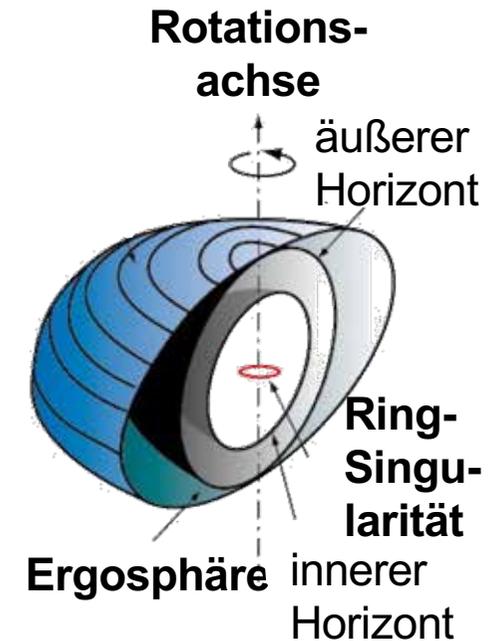
Fotostrecke: Das sind Einsteins Wellen



# GW150914: Eigenschaften

## ■ Advanced LIGO Resultate: extrahierte BH-Parameter

GW Parameter	Resultat
Abstand d	$(440 \pm 170)$ 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 ( $M_{\odot}$ )	$3.0 \pm 0.5$



## 5. Weitere Anwendungen des Lasers

- Vermessungswesen  
[ Bsp:  $\Delta d$  (Erde-Mond)  $\sim 19\text{cm}$  ]
- Opt. Kommunikation
- Schneiden [ Bsp: Autoindustrie  
Behälterind.  
Medizin ]
- Holographie
- Fusion

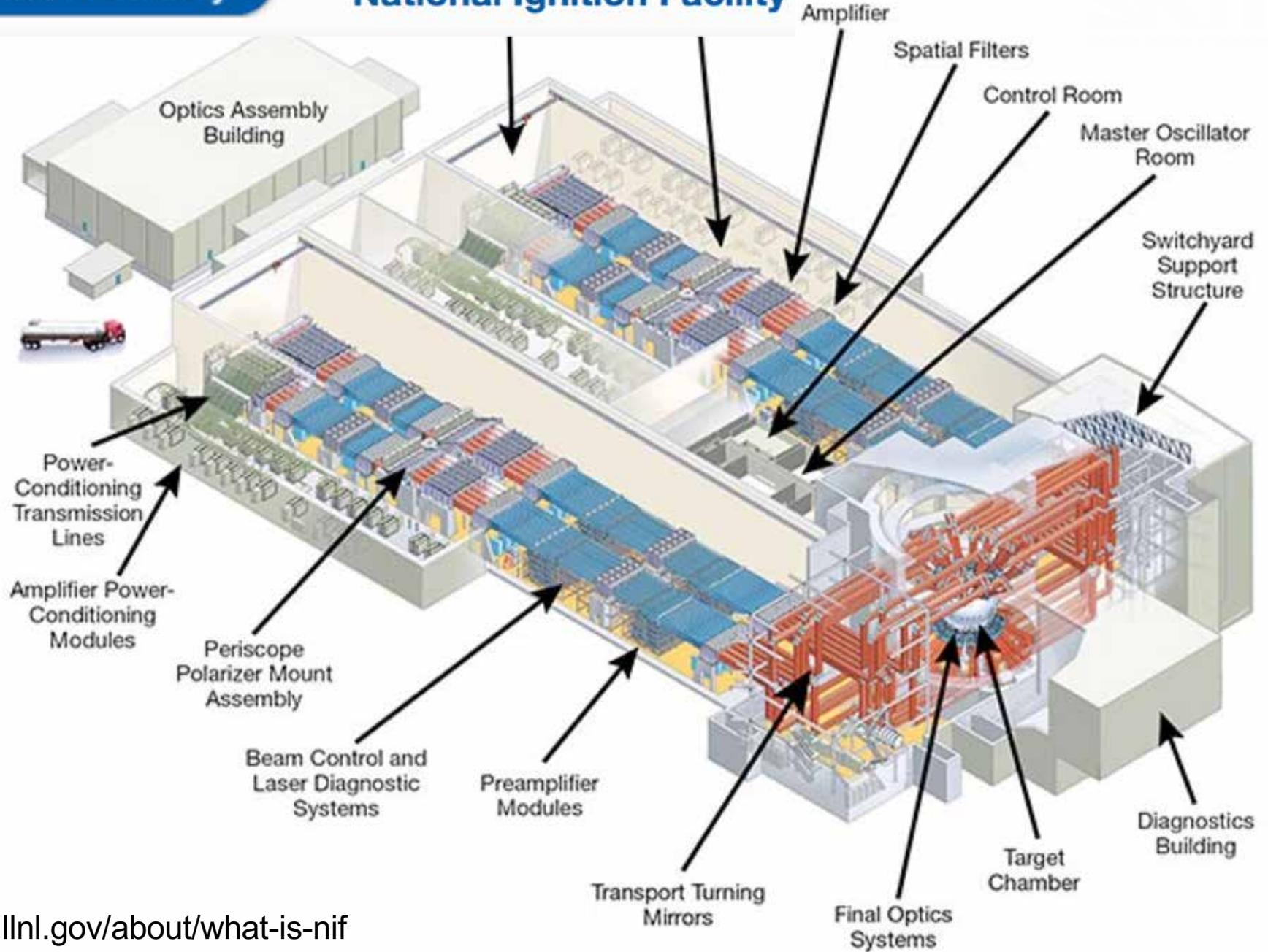


Kompression um  $\times 1000$   
 $T \sim 10^7 - 10^8 \text{ K}$

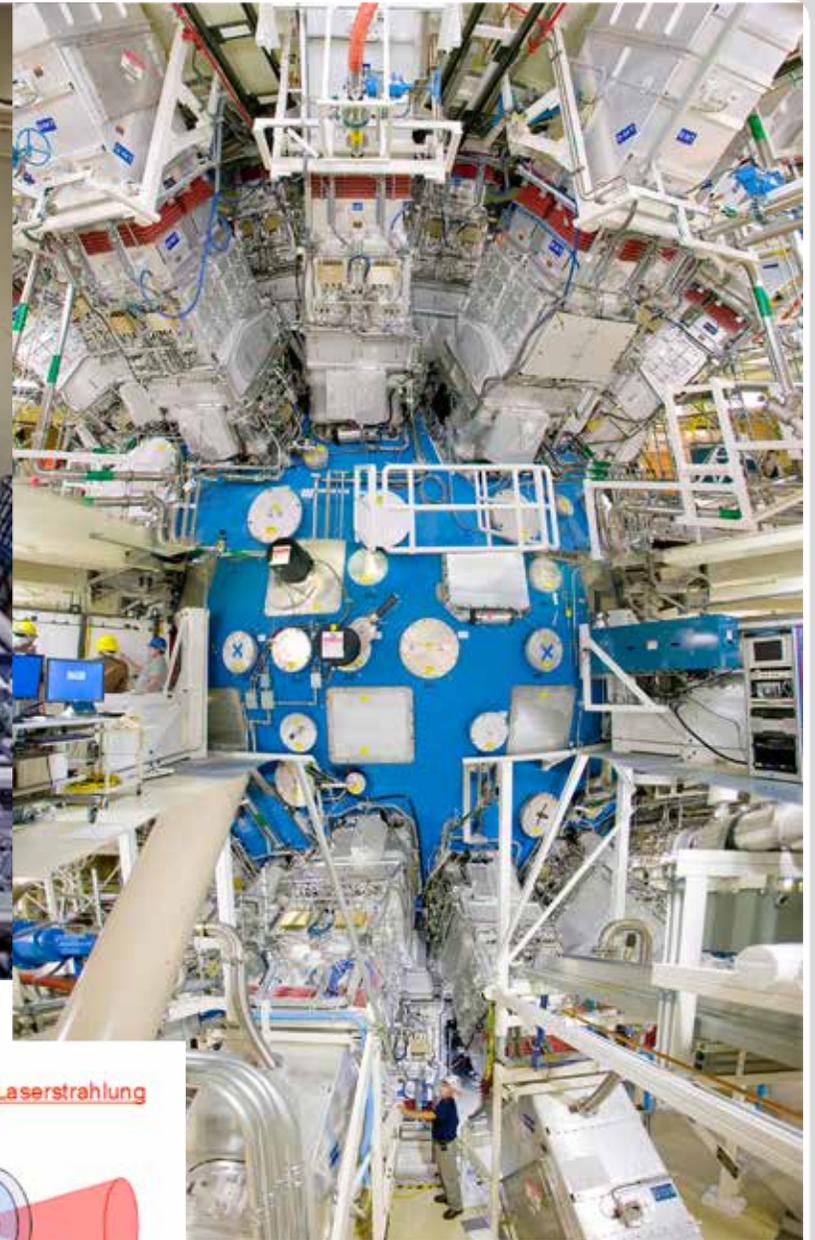
Für 1 Kugel / Pellet :

Fusionsenergie  $\hat{=}$  1 Fass Öl

# National Ignition Facility

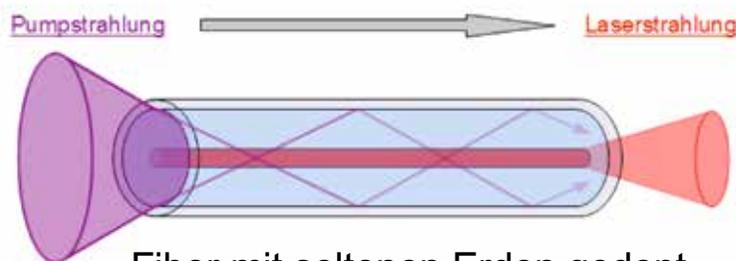


<https://lasers.llnl.gov/about/what-is-nif>



## NIF-Laser:

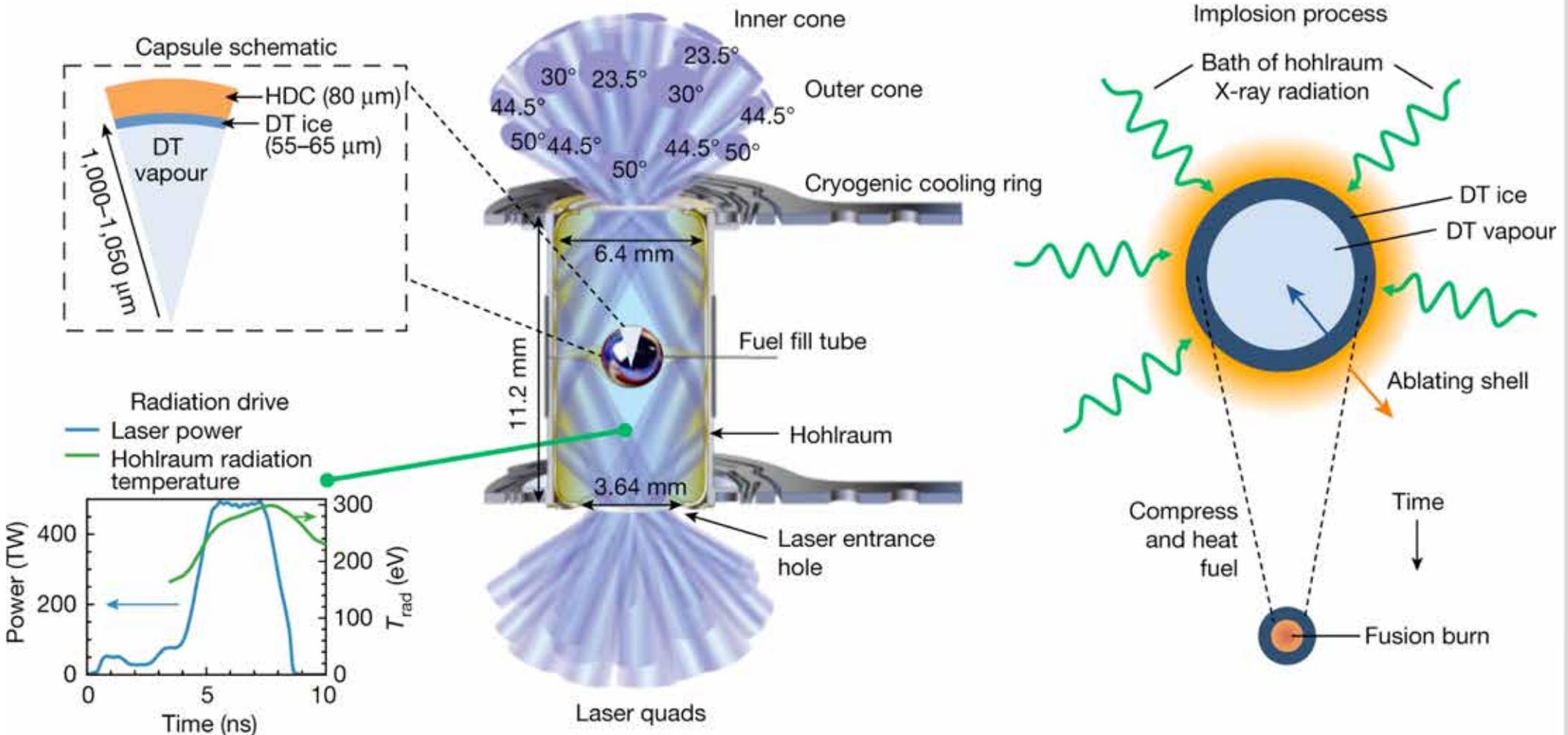
- Prinzip des Faserlasers
- 500 Terawatt Leistung, 1,8 MJ
- Zugeführt durch 192 Laser
- Wellenlänge  $0,35 \mu\text{m}$
- Pulsdauer 20 Nanosekunden



Fiber mit seltenen Erden gedopt  
[https://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html)

**Superstrahler**

# Prinzip der Fusionsreaktion





## 1. Einführung

## 2. Experimentelle Grundlagen - Atome

- 2.1 Einheiten in der Atomphysik
- 2.2 Eigenschaften von Atomen
- 2.3 Atomstruktur & Streuexperimente
- 2.4 Rutherford-Streuung & Atommodell

## 3. Teilchen-Welle Dualismus

- 3.1 Photonen und ihre Wechselwirkung - Temperaturstrahlung
- 3.2 Elektronen & Materiewellen
- 3.3 Atominterferometrie

## 4. Bohrsches Atommodell

- 4.1 Spektroskopie
- 4.2 Bohrsche Postulate
- 4.3 Anregung durch Stöße
- 4.4 Bohr-Sommerfeld Theorie

## 5. Elemente der Quantenmechanik

- 5.1 Schrödinger-Gleichung
- 5.2 Einfache quantenmechanische Systeme
- 5.3 Messungen in der Quantenmechanik
- 5.4 Tunneleffekt

## 6. Das Wasserstoff-Atom

- 6.1 Quantenmechanik des H-Atoms (Grundzüge)
- 6.2 Schalenstruktur & Termschema
- 6.3 Bahn- und Spinmagnetismus
- 6.4 Richtungsquantelung
- 6.5 Feinstruktur & Spin-Bahnkopplung
- 6.6 Lamb-Verschiebung
- 6.7 Hyperfeinstruktur
- 6.8 Atomuhren

## 7. Atome im Magnetfeld und elektrischen Feld

- 7.1 Elektronspin-Resonanz
- 7.2 Zeeman-Effekt
- 7.3 Paschen-Back Effekt
- 7.4 Kernspinresonanz
- 7.5 Stark-Effekt

## 8. Mehrelektronensysteme

- 8.1 Helium-Atom
- 8.2 Kopplung von Drehimpulsen
- 8.3 Periodensystem & Schalenstruktur

## 9. Atome & Strahlungsprozesse

- 9.1 Röntgenstrahlung
- 9.2 Strahlungslose Prozesse
- 9.3 Laser

## 10. Eigenschaften stabiler Kerne

---

- 10.1 Einführung
- 10.2 Rutherford-Streuung & Wirkungsquerschnitt
- 10.3 Kernradien & Formfaktoren
- 10.4 Kernmodelle & Kernkräfte
- 10.5 Kernreaktionen
- 10.6 Kernspaltung & Kernfusion

## 11. Instabile Kerne

---

- 11.1 Radioaktive Zerfallsprozesse
- 11.2  $\alpha$ -Zerfall
- 11.3  $\beta$ -Zerfall & schwache Wechselwirkung
- 11.4  $\gamma$ -Zerfall & elektro-magnet. Wechselwirkung

## 12. Physik der Moleküle

---

- 12.1 Molekülbindungen
- 12.2. Energiezustände
- 12.3 Systeme mit vielen gebundenen Atomen