

Helium-Neon Laser

- 1960 von dem iranischen Physiker Ali Javan zusammen mit William R. Bennett und Donald R. Herriott entwickelt
- der erste Laser, der Licht im kontinuierlichen Betrieb erzeugt
<https://de.wikipedia.org/wiki/Helium-Neon-Laser>

Aufbau eines He-Ne-Lasers

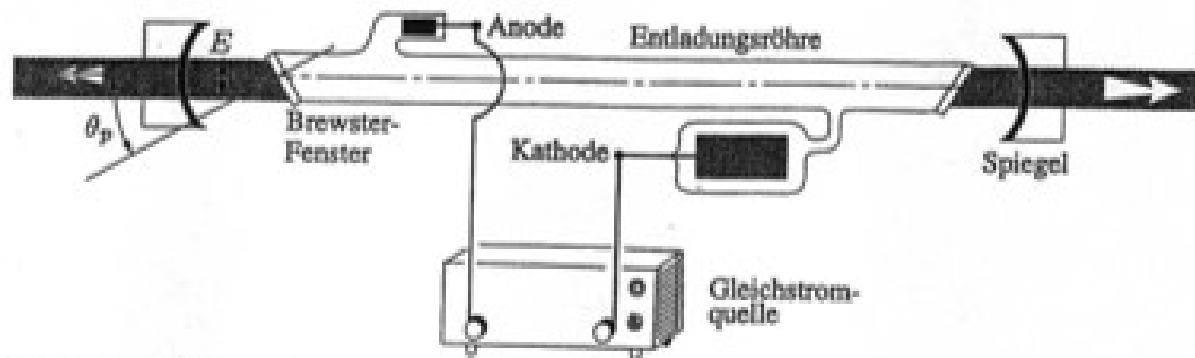


Bild 13.14: Ein einfacher, früher Helium-Neon-Laser.

Typische Spannung
1700 – 3500 V

Spiegel

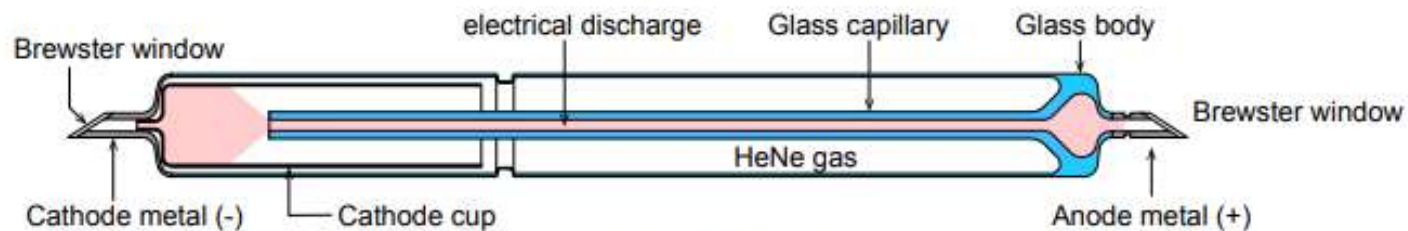
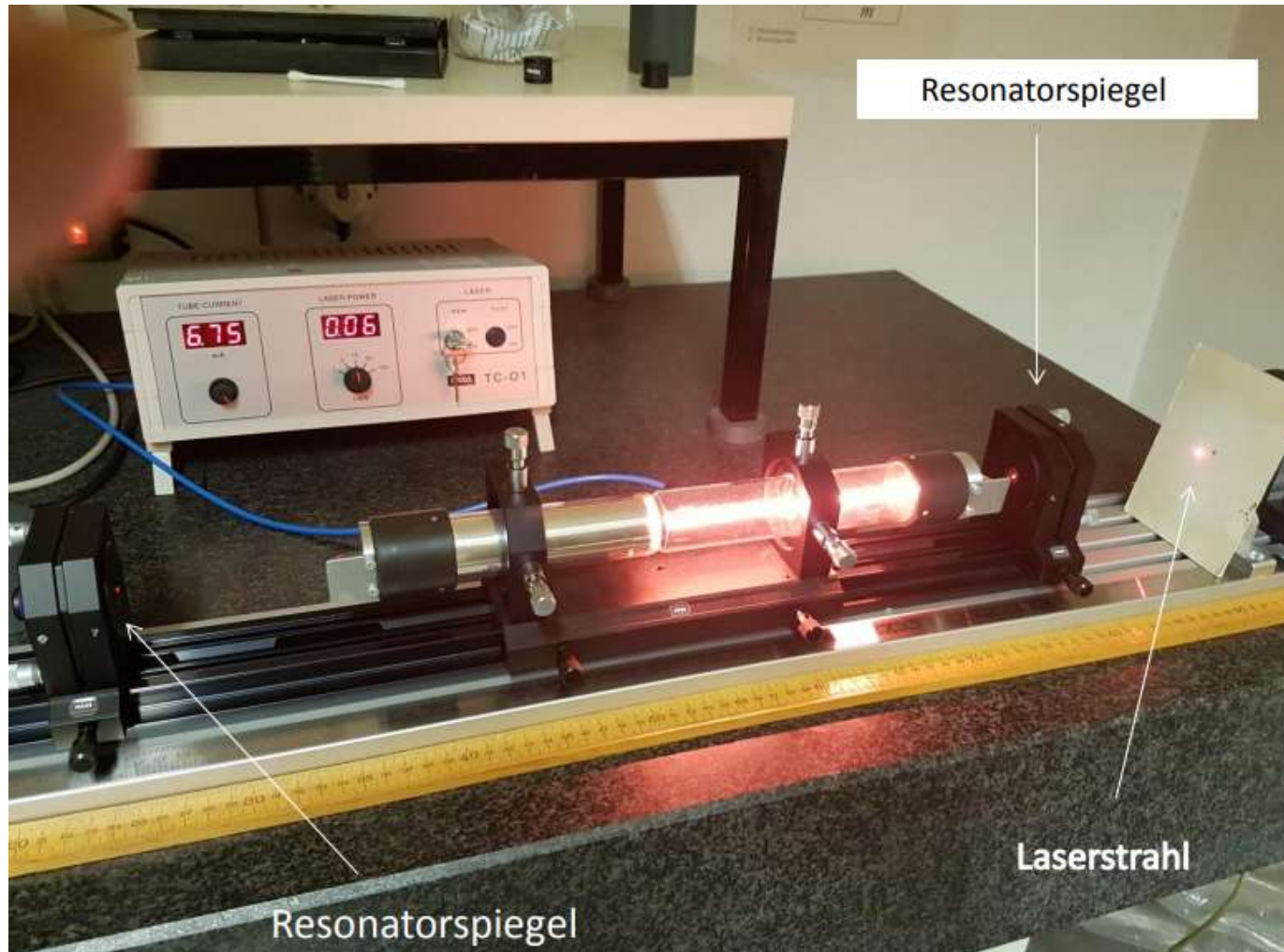


Fig. 5: Cut through a HeNe laser tube with Brewster windows on both sides

Spiegel



He-Ne-Laser: Energieniveaus / Pump- und Laserprozeß

1. Pumpprozeß über Helium
Dort Anregung durch Gas Entladung
2. Energieübertragung angeregte Helium- an Neon-
Atome durch Stöße 2.ter Art
3. Metastabiles 3s Niveau im Neon wird angeregt,
Besetzungsinversion stellt sich ein
4. Mehrere Laserübergänge im Neon möglich, meist
genutzter Übergang 3s → 2p mit Wellenlänge
632,8 nm
5. Relaxation 2p → 1s
6. Rückkehr der Neon-Atome von 1s in den
Grundzustand nur durch Stöße mit der
Kolbenwand möglich.
Daher kleine enge Kapillarröhre
7. Meist benutzte Wellenlänge 632,8 nm

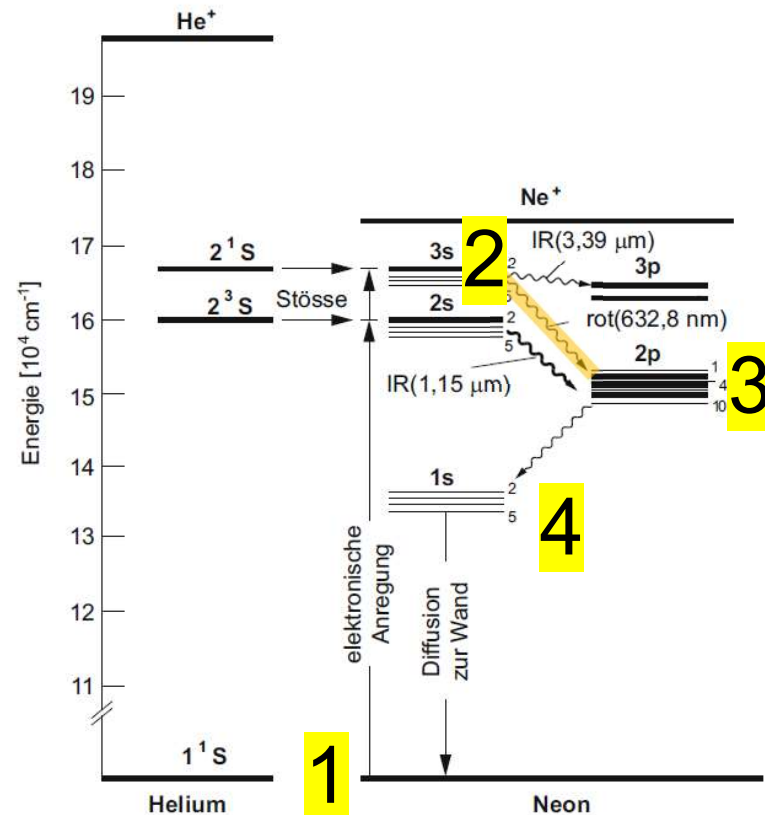
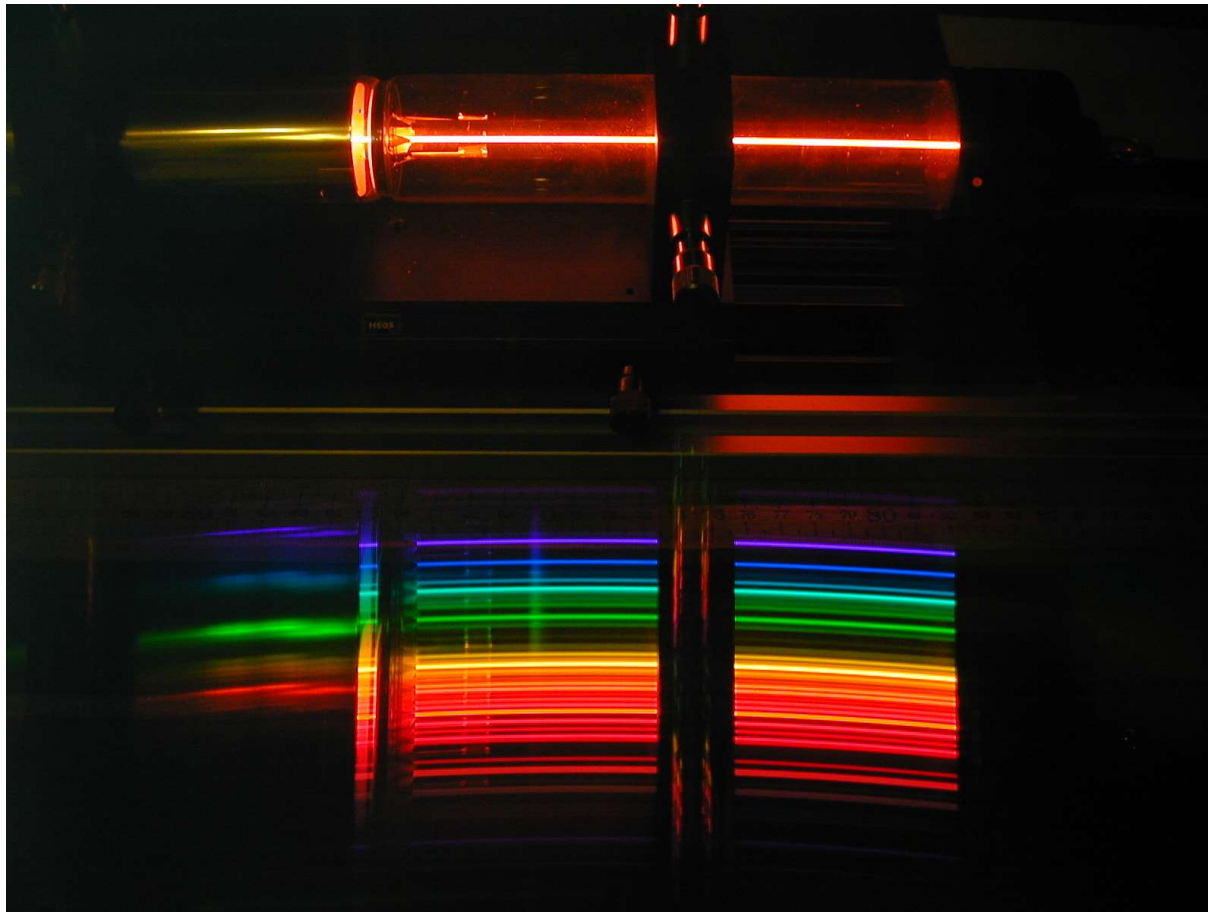
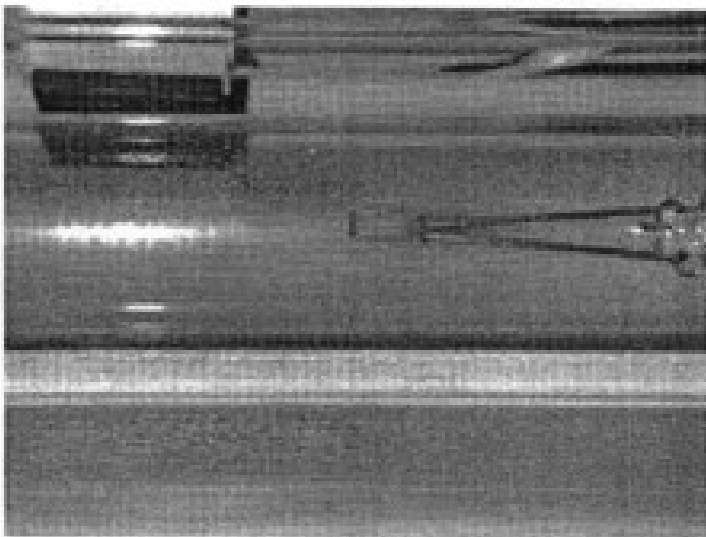
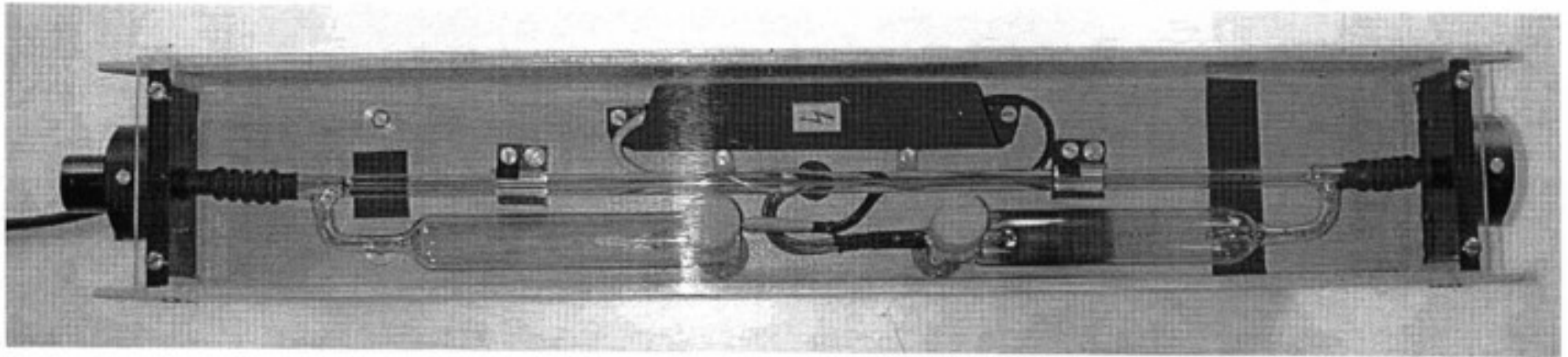


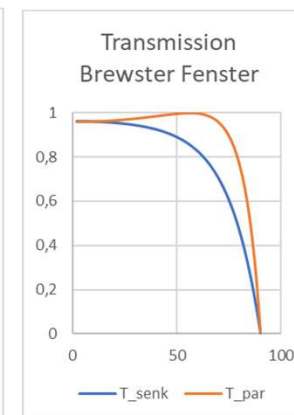
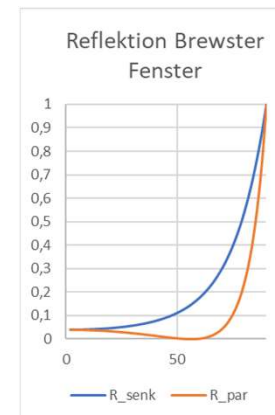
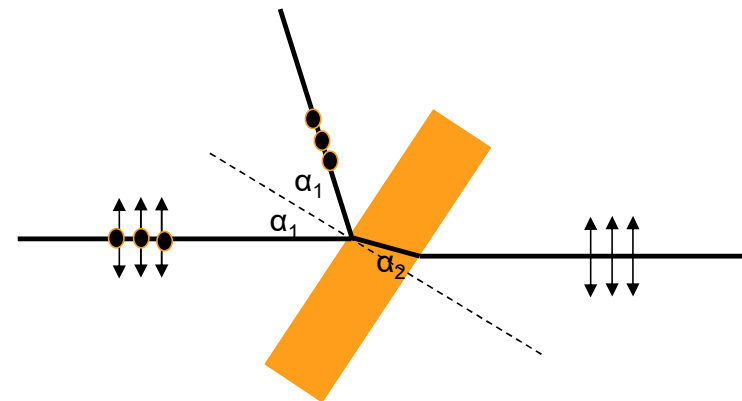
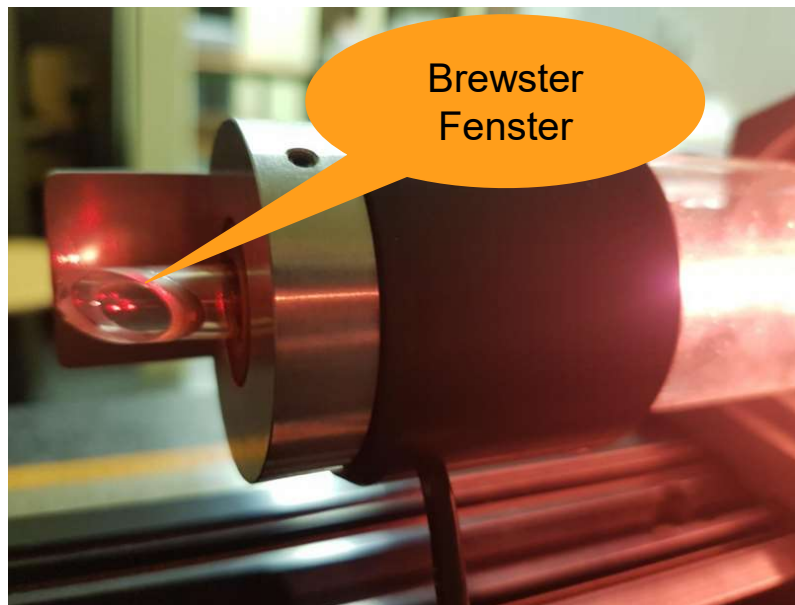
Abb. 13.2 He-Ne-Energieniveauschema mit den dominanten Übergängen

Fluoreszenz des angeregten Ne





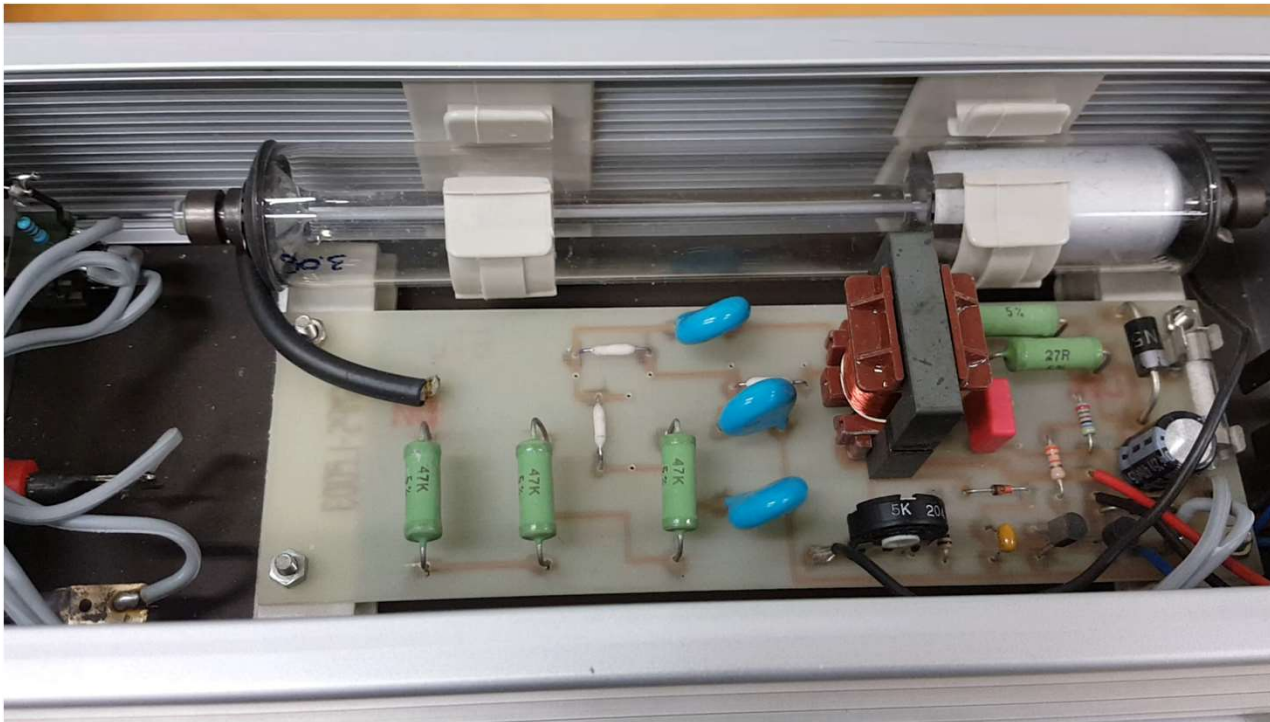
Um Reflexionsverluste zu vermeiden hat die Laserröhre an beiden Enden Abschlußfenster im sog. Brewsterwinkel



Brewster Winkel
 $\alpha_{Br} = \arctan(n_2/n_1)$

Unter diesem Winkel praktisch keine Reflexionsverluste für parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht.

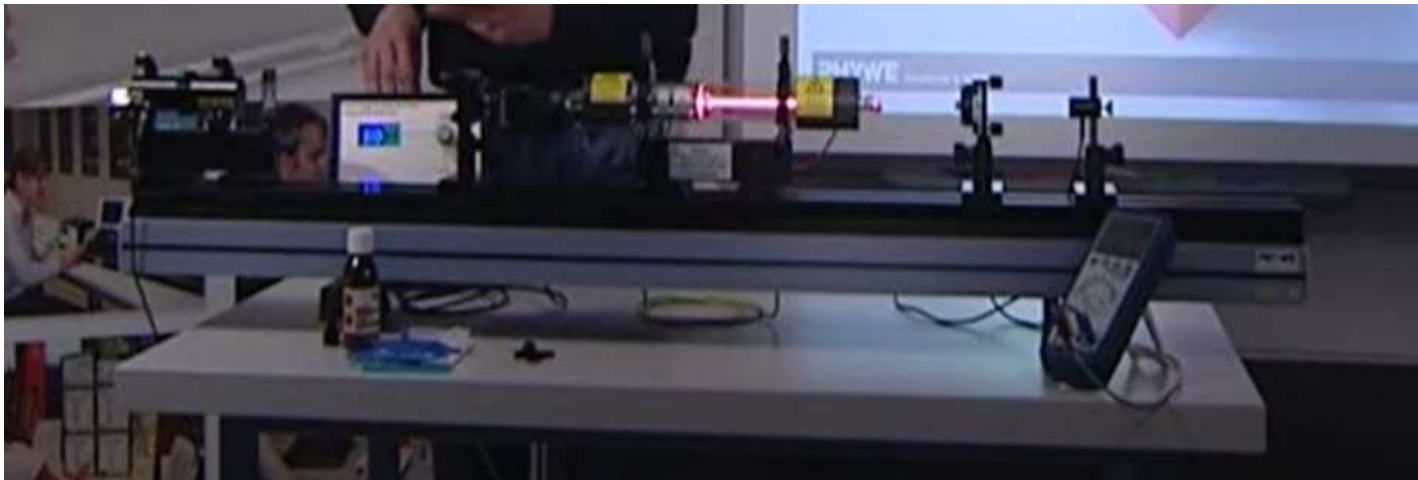
Demo: Helium Neon Laser



1. Spannung wird schrittweise erhöht
...
2. bis der Laser schließlich startet
...
3. Laserschwelle wird erreicht
...
4. Und übersritten

He-Ne Demo PHYWE

https://www.youtube.com/watch?time_continue=267&v=dSVLKzBVgc8&feature=emb_logo



... das Video gibt einen guten Eindruck davon wie empfindlich ein Laserresonator ist und wie aufwändig es sein kann einen Laser so zu justieren, daß er tatsächlich anläuft

CO₂ Laser

- **Prinzip, Aufbau**
- **Anwendung: Materialbearbeitung**
- **Bedeutung in der Industrie**

CO₂ Laser Steckbrief

Kohlenstoffdioxidlaser, CO₂-Laser oder umgangssprachlich auch **Kohlendioxidlaser:**

- Wurde 1964 von C. Kumar & N. Patel bei den Bell Laboratories entwickelt.
- Lasermedium ist Kohlenstoffdioxid CO₂
- Ist einer der leistungstärksten und am häufigsten industriell eingesetzten Laser (heute: neben den Festkörperlasern).
- Erreicht Ausgangsleistungen von bis zu 80 kW und Pulsenergien bis 100 kJ
- CO₂-Laser liefert Infrarotlicht mit einer Wellenlänge 9,4 oder 10,6 µm.
- CO₂-Laser sind relativ effizient und kostengünstig
 - Einsatz besonders in der industriellen Materialbearbeitung
 - Wirkungsgrad liegt bei etwa 15 bis 20 %

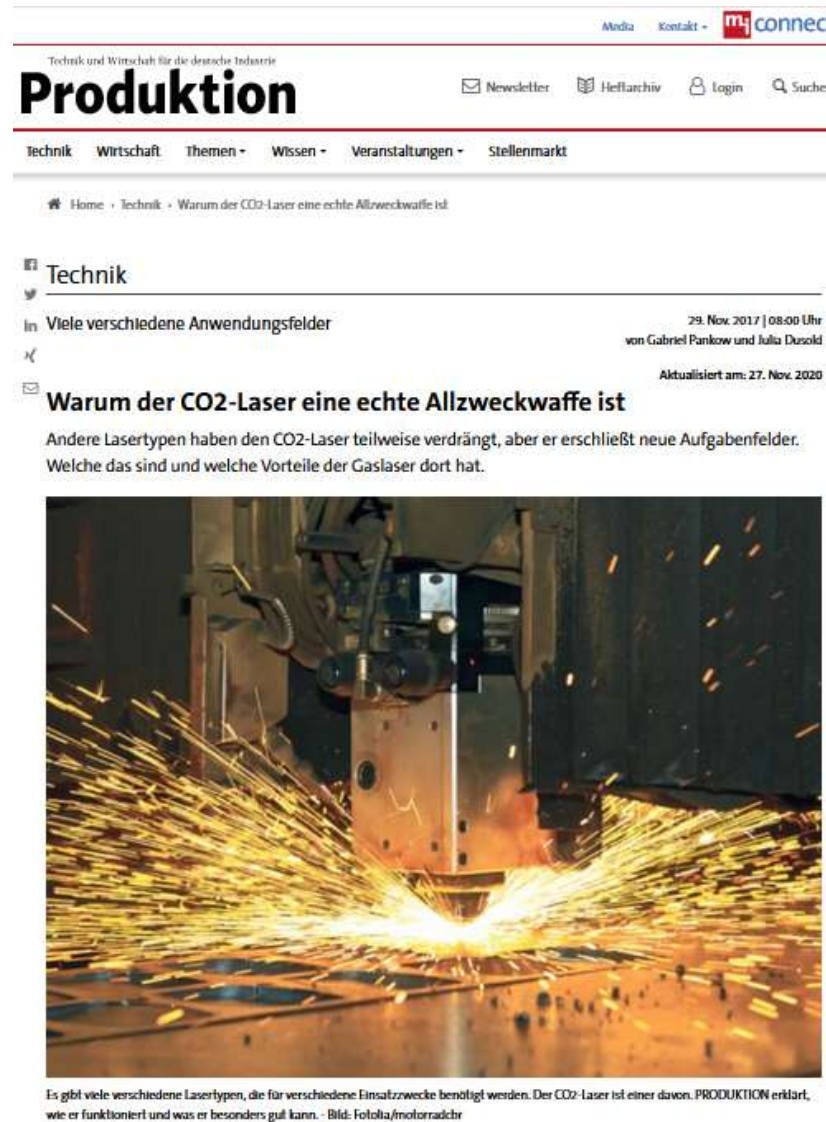
Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlendioxidlaser>

Übersichtsartikel CO₂ Laser in der Industrie (2017)

<https://www.produktion.de/technik/warum-der-co2-laser-eine-echte-allzweckwaffe-ist-243.html>

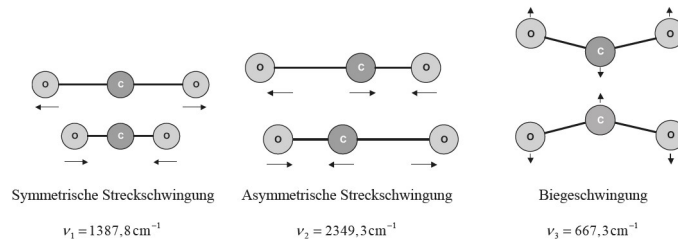
CO₂ Laser – Arbeitspferd in der Materialbearbeitung mit verschiedensten Anwendungen

- Schweißen, Schneiden von Metallen
- Schneiden, Trennen Stanzformen aus Holz
- Textilschnitte
- Aushöhlungen Armaturenblech
- Texturen auf Jeansstoffen
- Gezieltes Schwächen von Folien (Stellen zum Aufreißen)
- Elektronik / Lithographie
- Gravieren...



CO₂-Molekül, das aktive Medium im CO₂ Laser

- CO₂ Molekül besteht aus drei Atomen: O – C – O
- O-C-O können gegeneinander schwingen und rotieren. Dadurch entstehen Energieniveaus, die sog. Schwingungs-Rotations-Niveaus



- Für den CO₂ Laser sind zwei Rotations-Schwingungs-Übergänge bei 9600 nm und bei 10600 nm relevant.

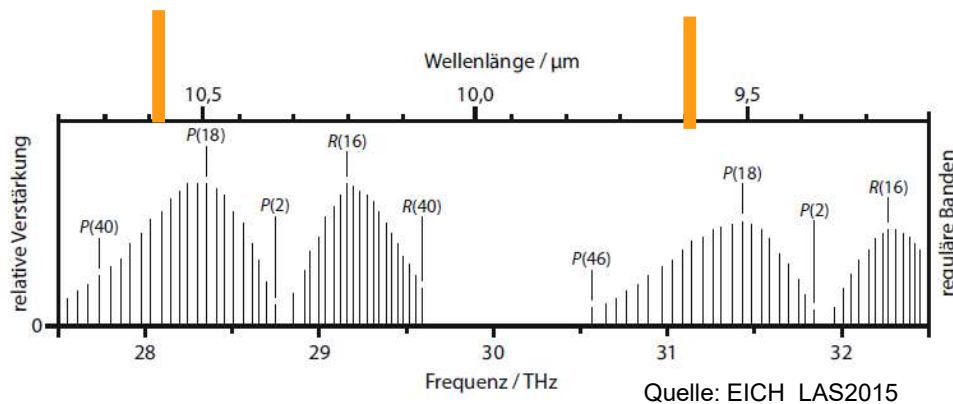
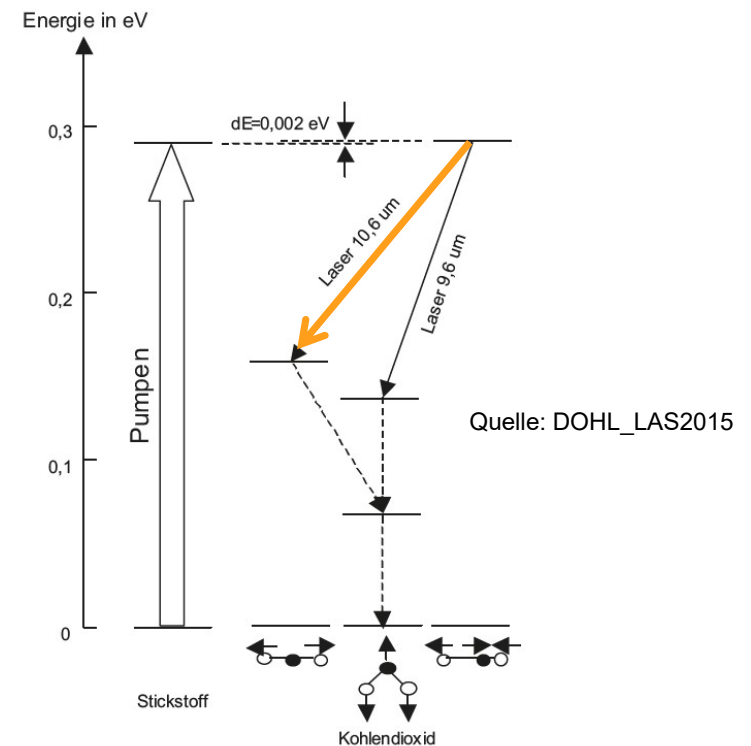


Abb. 6.5 Emissionslinien des CO₂-Lasers



- Anregung erfolgt bei N₂, mit Stößen 2.ter Art
- Der CO₂ Laser müsste streng genommen N₂-CO₂-Laser genannt werden.

CO₂ Laser - „Geschlossenes System“

- **Röhre wird ab Werk mit Gas befüllt.**
 - Füllung: 20% CO₂, 20% N₂, 60% He, Fülldruck ca. 10-25 mbar
- **Laserleistungen von ca. 60 W pro Meter Entladungslänge**
- Pumpen erfolgt per Hochspannung / Gasentladung
- **Laserspiegel bilden Enden des Entladungsrohrs und sind fest verklebt**
 - Spiegelmaterialien für IR Licht: Ge, ZnSe
 - Keine Justierung nötig/möglich
- **Problem: Zersetzung des CO₂ Gases**
 $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}^+$, führt zu Leistungsabfall über die Zeit
- **Lösung:**
Zugabe von H₂O: $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$
Pt-Katalysator $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$ (Pt als Katalysator), Pt als Elektroden

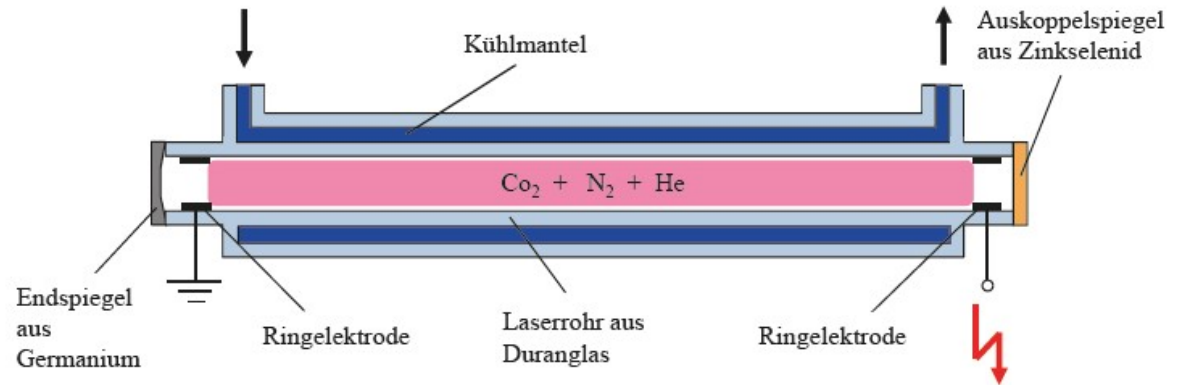
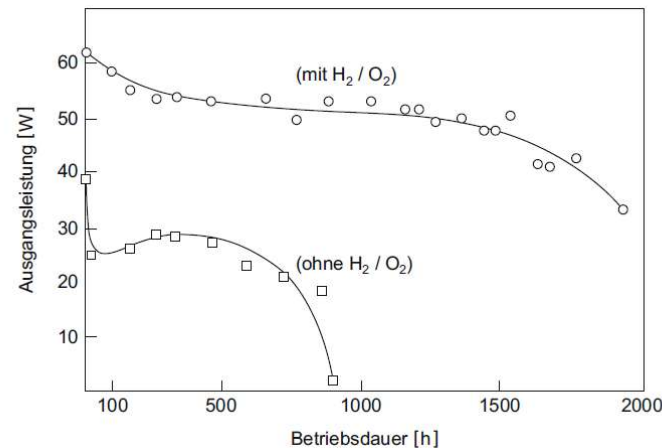


Abb. 2.57: Abgeschmolzener CO₂-Laser.

Quelle: DOHL_LAS2015



Leistungsabfall eines
CO₂ Lasers über die
Betriebsstunden

Quelle: SIGR_LAS2018

CO₂ Laser Röhre

Beispiel: Hersteller (vermutlich aus China); Vertrieb über Firma Vevor;
VK im Internet < 400€ (ohne Netzteil)



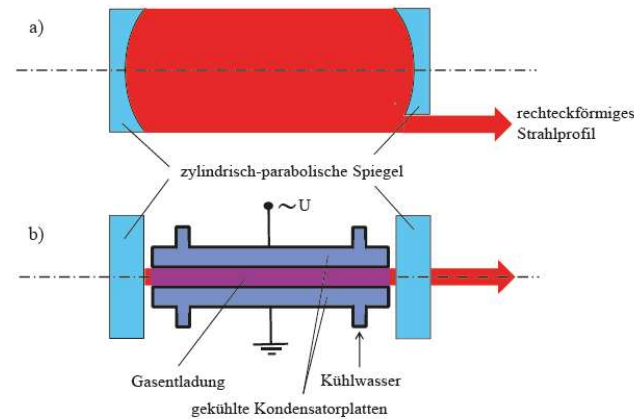
Spezifikationen

- Ausgangsleistung: 100 W
- Länge: 1430 mm
- Strahldurchmesser: 2,5 mm
- Wellenlänge: 10,6 Mikron
- Material: Borsilikatglas
- Außendurchmesser: 80 mm
- Auslösespannung: 26 KV
- Arbeitsspannung: 20 KV
- Optimaler Betriebsstrom: 7-40 mA
- Bruttogewicht: 16,46 kg
- Packungsgröße: 161 x 32 x 27 cm

https://www.vevor.de/laserroehre-c_11139/co2-glas-laserroehre-100w-fuer-laser-graviermaschine-gravur-zubehoer-acryl-1430mm-p_010187824178

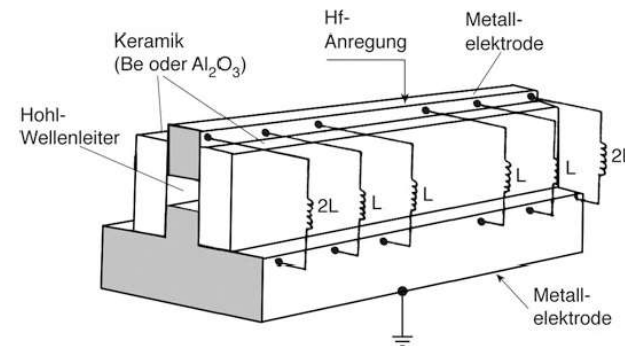
Waveguide CO₂ Laser – weitere häufig verwendete Variante des „geschlossenen Systems“

- Laserrohr = Kapillare aus BeO oder Al₂O₃
- „dielektrischer Wellenleiter“, d.h. Strahlung wird an Wandflächen reflektiert. Es bilden stehende Wellen (analog Mikrowellen in Hohlleitern).
- Anregung erfolgt meist als **Hochfrequenzanregung**
Vorteile: keine Elektroden im Lasergas nötig (Hochfrequenz wird kapazitiv über die Rohrwand eingekoppelt)
- Systeme bis 600 W Laserleistung erhältlich
- Wird gerne auch als „Instabiler Resonator“ verwendet



Quelle: DOHL_LAS2015

Abb. 2.58: Waveguide-Laser in Draufsicht (a) und in Seitenansicht (b). Sein Resonator ist instabil.

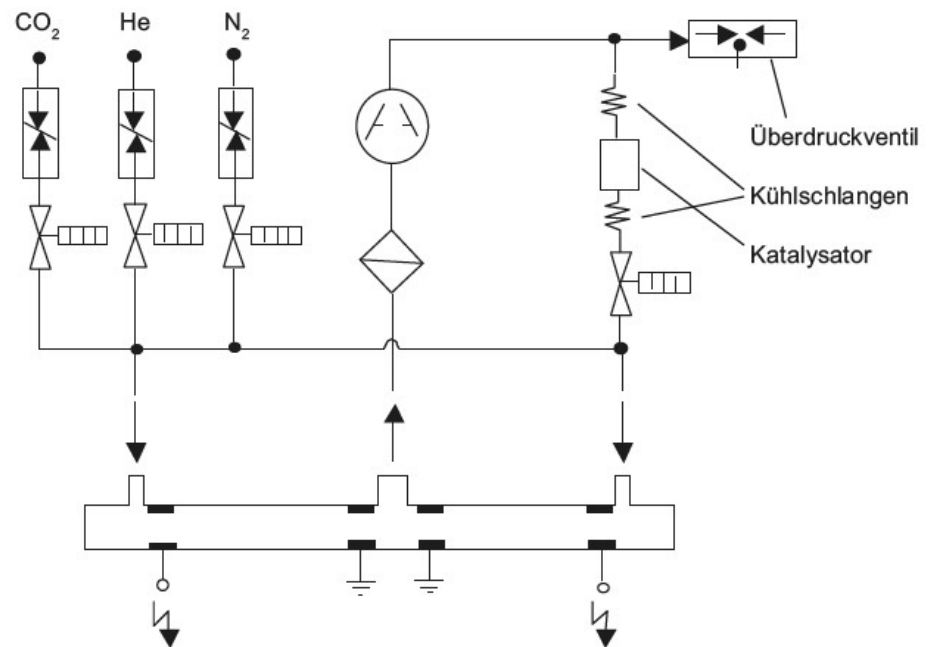


Quelle: EICH_LAS2015

Abb. 6.7 Aufbau eines Wellenleiter-CO₂-Lasers mit Hochfrequenz-Anregung

Offene CO₂ Laser Systeme – „Langsam geströmtes System“

- **CO₂ / N₂ / He Gasgemisch wird permanent von außen zugeführt (Flow 1-2 m/s)**
- Katalysator im Gas-Rücklauf ermöglicht Wiederverwendung der Gase
- **Laserrohr mit angeschmolzenem Kühlmantel**
- Kupferelektroden
- Hier im Bild:
zwei Entladungsstrecken um eine längere CO₂ Laserstrecke (mehr Verstärkung) zu erhalten (ohne dass doppelte Hochspannung nötig wäre)
- **Resonatorlängen bis 20m Länge** (gefaltet in 1-1,5m Teilstücke) wurden realisiert
- Technische Grenzen durch Kühlung und Temperatur Stabilität des Resonators
- **Laserleistung bis in den kW Bereich**



Quelle: DOHL_LAS2015

Abb. 2.59: Resonatoraufbau und Gasversorgung eines langsam geströmten CO₂-Lasers mit zwei Entladestrecken und Katalysator.

CO₂ Laser – „schnell geströmtes System“

- **Gasstrom mit 200-250 m/s**
- Gas wird umgewälzt, Kühlung erfolgt über das Gas selbst außerhalb des Lasers in einem Wärmetauscher
- **Laserleistung ca. 400 W pro m Entladelänge** (beim langsam geströmten System nur 60-80 W/m)
- **Anregung erfolgt vorzugsweise über HF**
 - HF Sender robuster im Vergleich zu HV Netzteilen bei DC-Entladung
 - keine Elektroden im Lasergas, somit kein Materialabtrag an den Elektroden
 - Es kondensiert kein Elektrodenmaterial auf den Spiegeln
 - Homogenität der Entladung ist höher als bei der DC-Entladung
- **Laserleistungen bis 20 kW wurden realisiert**

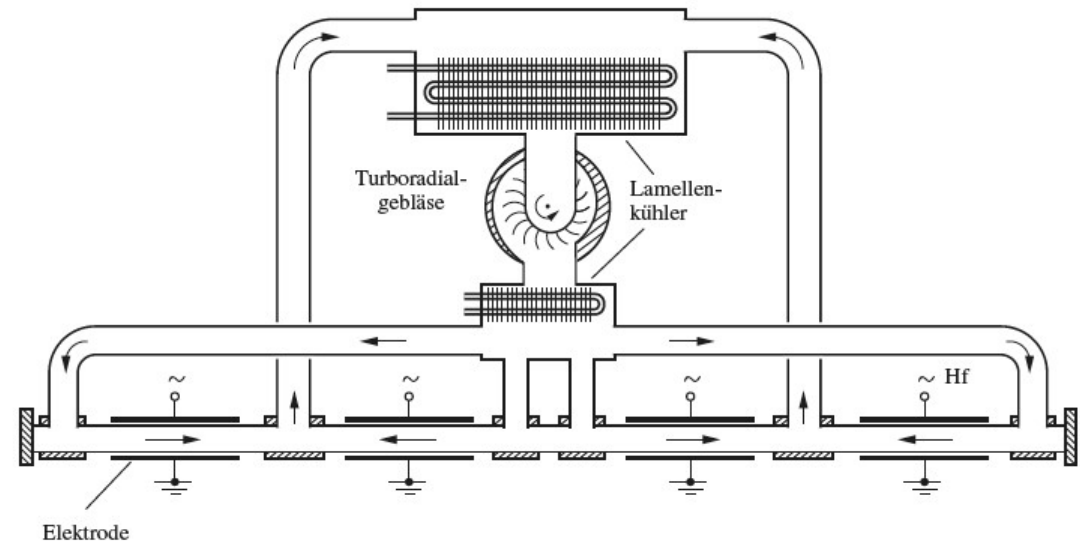


Abb. 2.60: Schematische Darstellung eines schnellgeströmten CO₂-Lasers mit vier Entladestrecken. Die Pumpenergie wird kapazitiv ins Lasergas eingekoppelt. Die schnelle Gasströmung wird durch ein Turboradialgebläse aufrechterhalten. Nicht gezeichnet sind Vakuumpumpe und Gasversorgung bzw. Gasabfuhr.

Quelle: DOHL_LAS2015

Beispiel: CO₂ Laser – schnell geströmtes System

- Entladungsstrecken sind hier ringförmig gefaltet um ein kompakteres System zu erreichen
- Laserleistung: bis 20.000 W



https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/co2-laser/truflow/

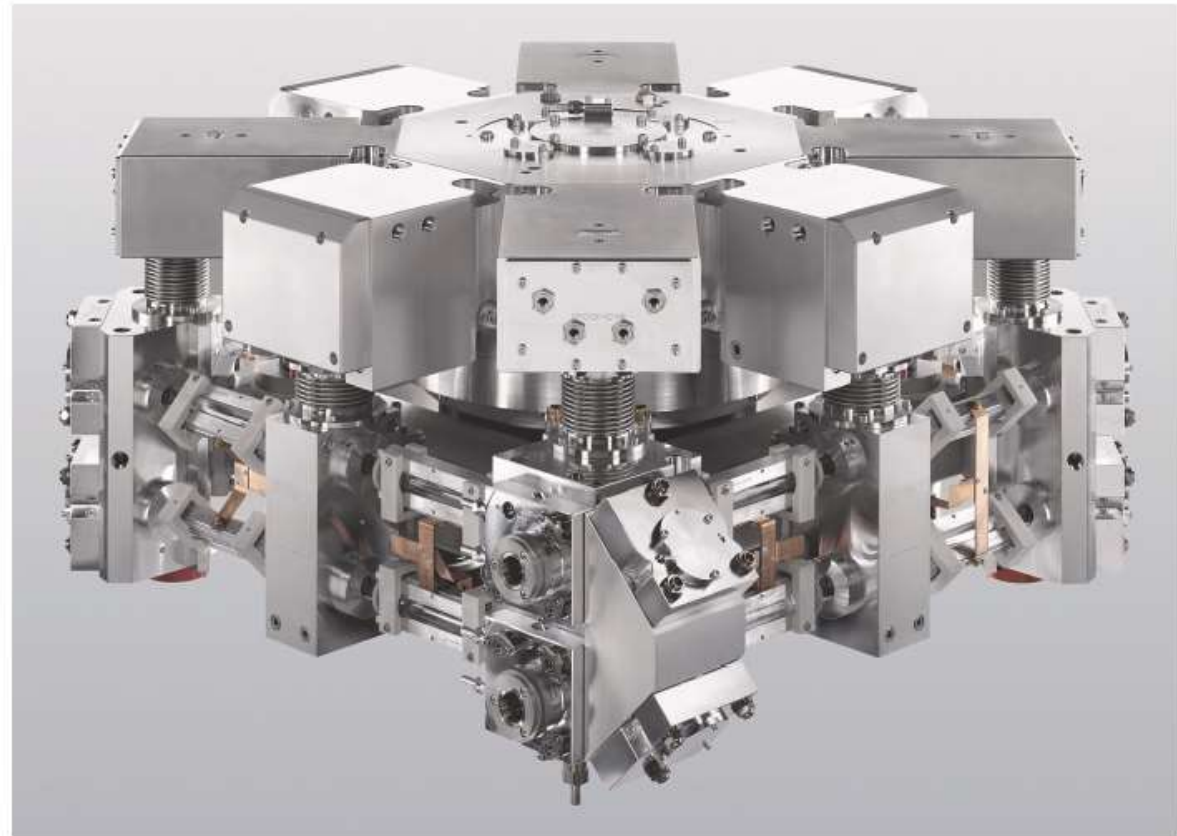


Abb. 2.61: Moderner Resonatoraufbau eines schnell geströmten CO₂-Lasers. Quelle: TRUMPF GmbH + Co. KG.

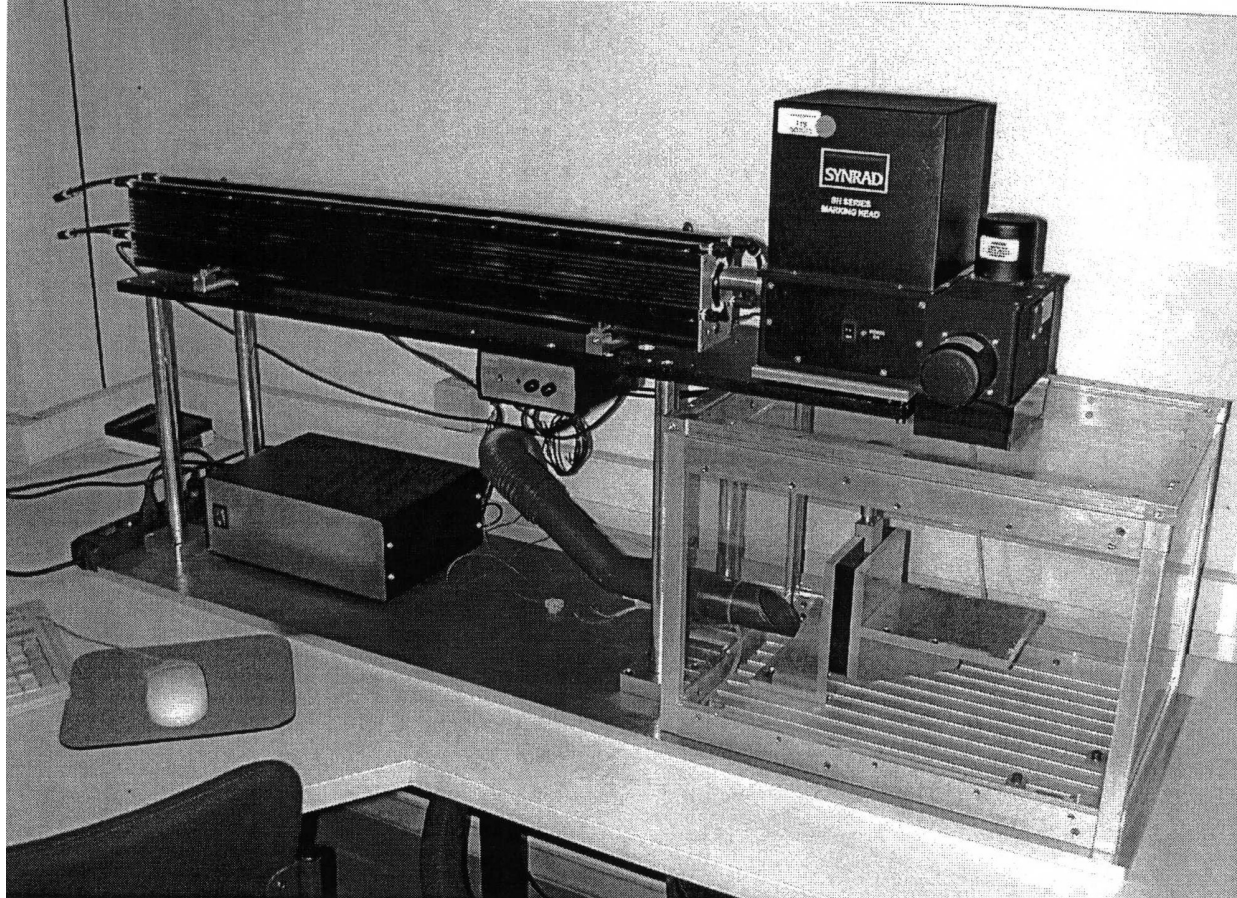
Quelle: DOHL_LAS2015

Beispiel CO₂-Slab-Laser (SLAB = engl. Platte, Waveguide Laser)



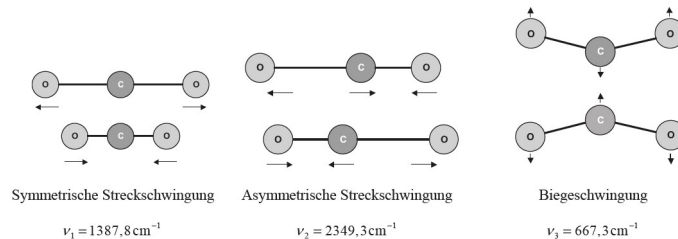
<https://www.rofin.de/produkte/co2-laser/co2-laser/dc-serie/>

Laser-Gravur mit CO₂ Laser im U A S Laser Labor



CO₂-Molekül, das aktive Medium im CO₂ Laser

- CO₂ Molekül besteht aus drei Atomen: O – C – O
- O-C-O können gegeneinander schwingen und rotieren. Dadurch entstehen Energieniveaus, die sog. Schwingungs-Rotations-Niveaus



- Für den CO₂ Laser sind zwei Rotations-Schwingungs-Übergänge bei 9600 nm und bei 10600 nm relevant.

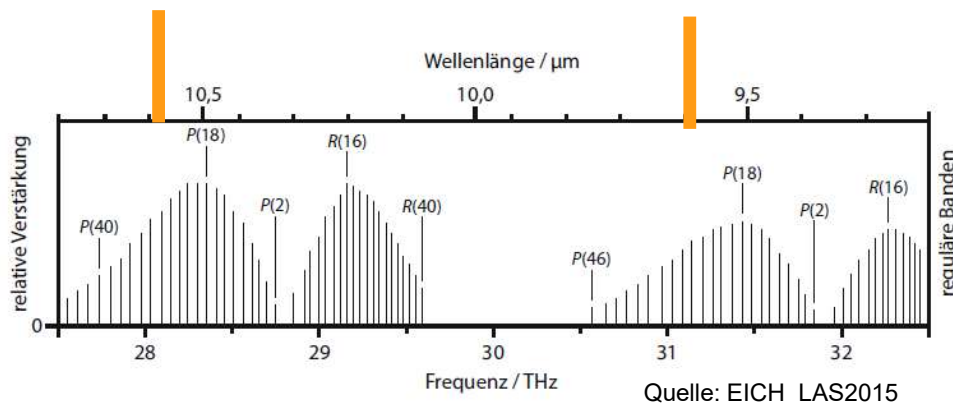
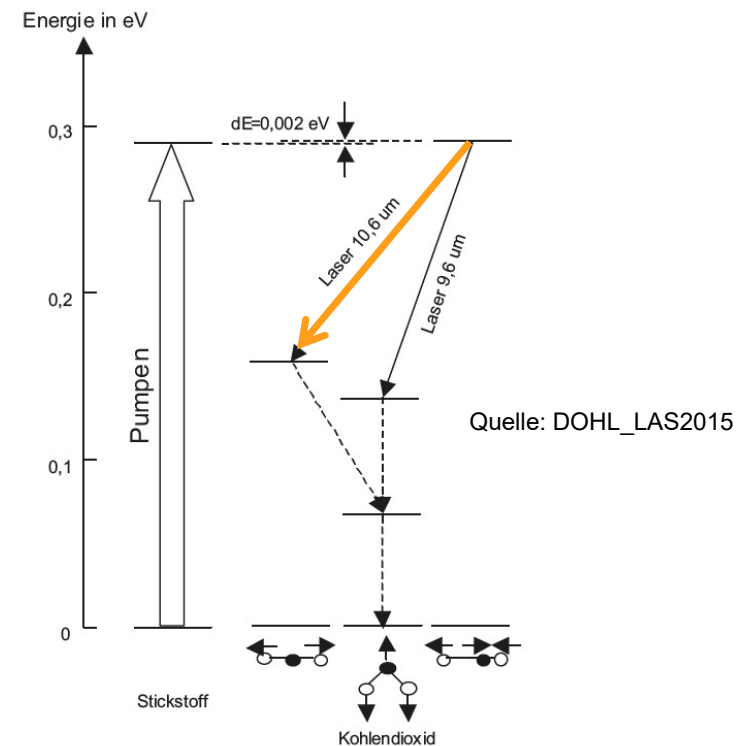


Abb. 6.5 Emissionslinien des CO₂-Lasers



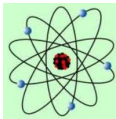
- Anregung erfolgt bei N₂, mit Stößen 2.ter Art
- Der CO₂ Laser müsste streng genommen N₂-CO₂-Laser genannt werden.

Festkörperlaser

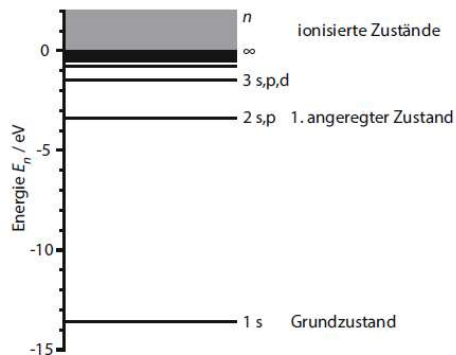
- Prinzip, Aufbau

Energieniveaus im Vergleich Atom - Molekül - Festkörper

Atom



- Atomkern
(Protonen, Neutronen)
- Elektronen
- Elektronen“bahnen“
- **Diskrete Energieniveaus**

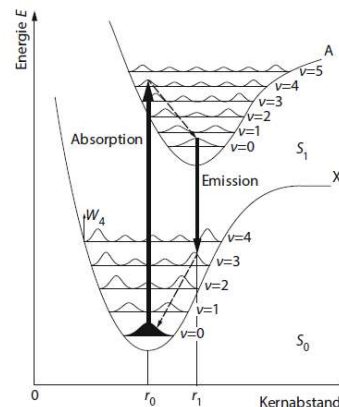


Moleküle

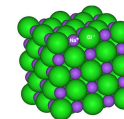


- Mehrere Atomkerne
- Elektronen beeinflusst durch Nachbaratome
- Schwingungen und Rotation der Kerne
- **Gemeinsame Elektronenorbitale**
- **Dicht beieinander liegende Rotations-Schwingungsniveaus**

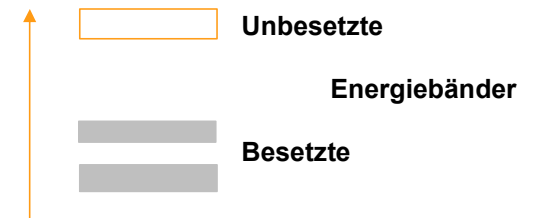
Hier:
2-Atomiges
Molekül



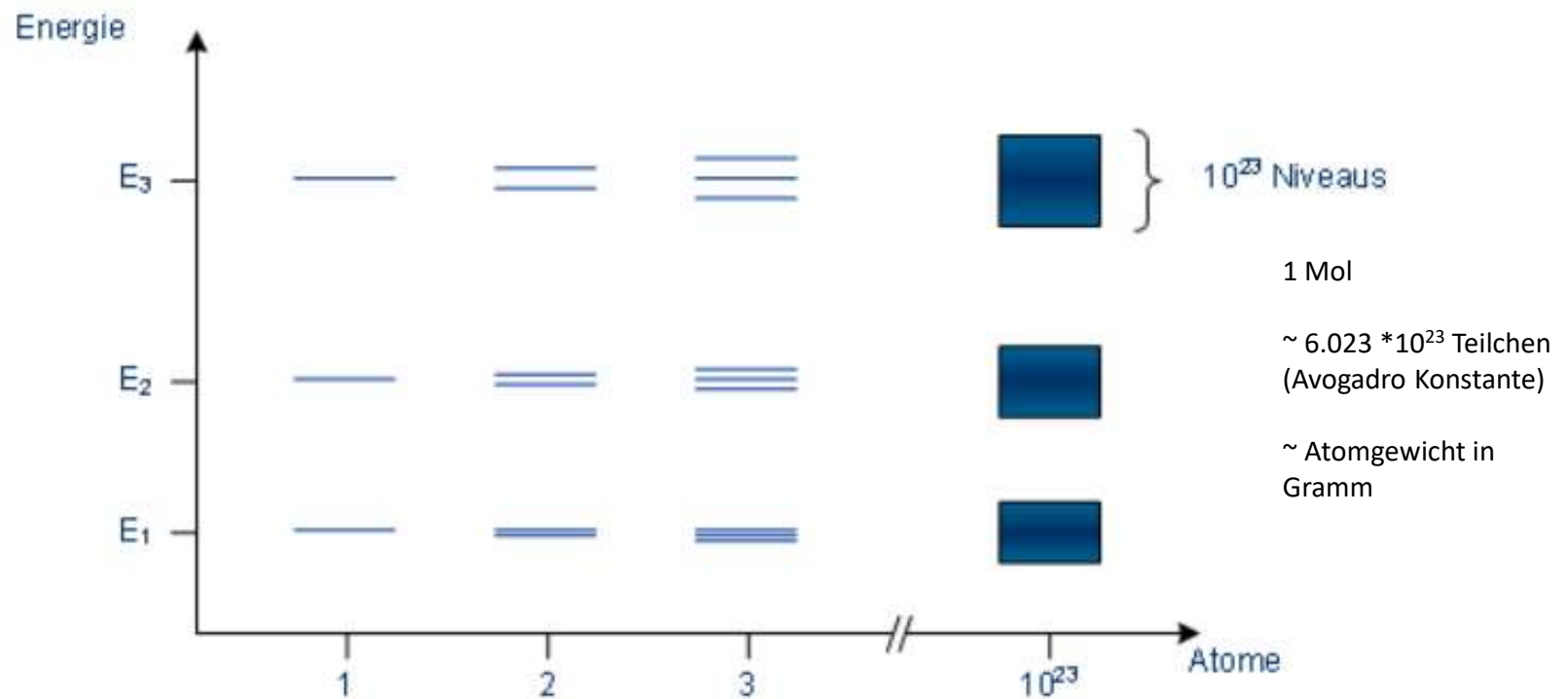
Festkörper



- Sehr viele Atome im Kristallverbund
- Elektronenzustände beeinflusst durch E-Felder der umliegenden Kristallatome
- Schwingungen im Kristallgitter
- **Quasi-kontinuierliche Energiebänder** (teilweise auch bestimmte diskrete Energieniveaus, wenn diese wenig durch Kristallumgebung beeinflusst werden)

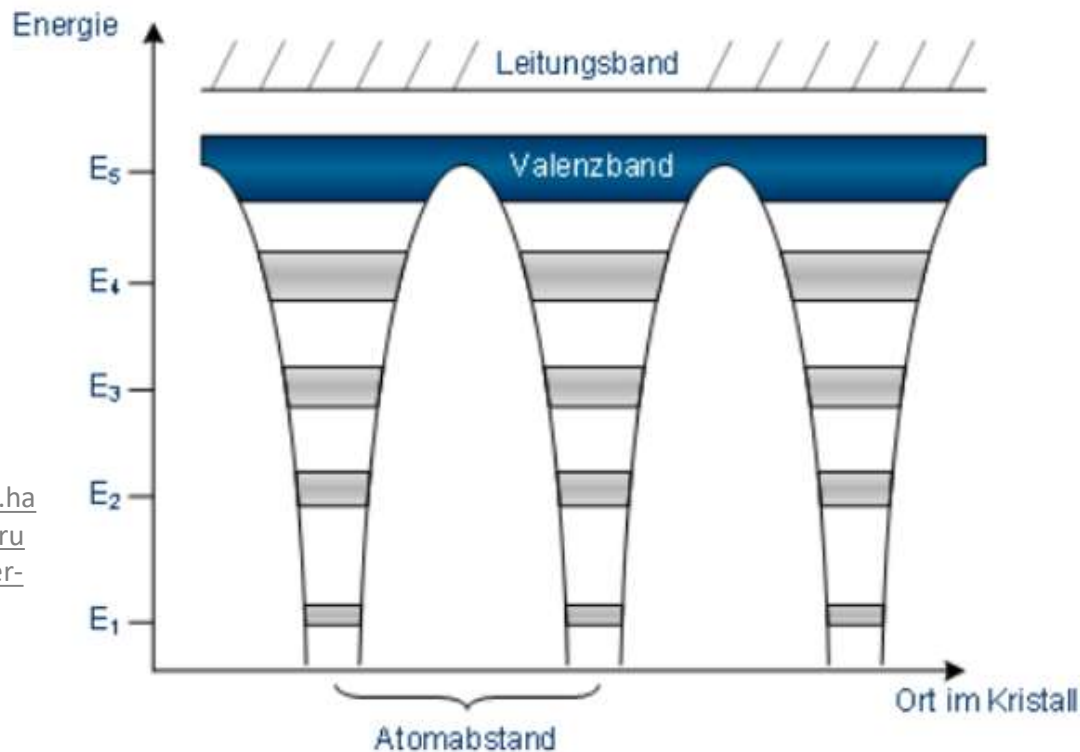


Aufspaltung von Energieniveaus durch gegenseitige Wechselwirkung von Atomen



<https://www.halbleiter.org/grundlagen/leiter-nichtleiter-halbleiter/>

Lokalisierte und delokalisierte Energiebänder im Kristall



Tief liegende Energieniveaus/bänder sind stark an einem Atom lokalisiert

Im Valenzband sind die Elektronen weniger stark an einem Atom lokalisiert.

Im Leitungsband können die Elektronen sich frei im Kristall bewegen.

<https://www.halbleiter.org/grundlagen/leiter-nichtleiter-halbleiter/>

Beispiel Rubin

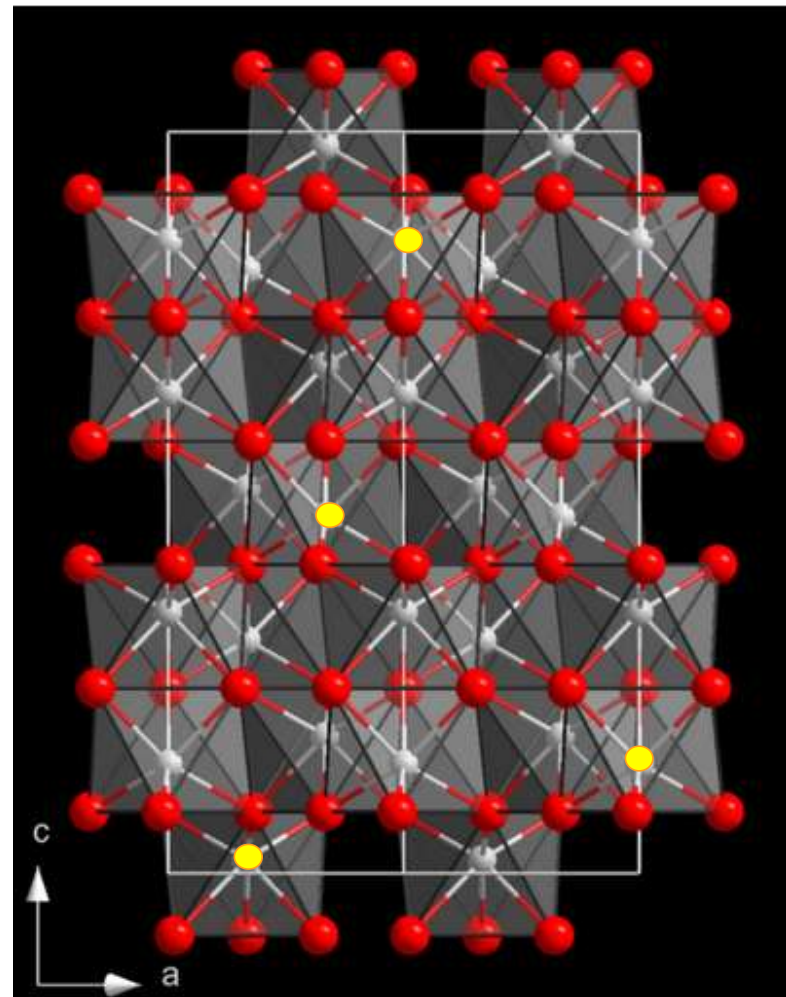
Laser:

Al_2O_3 Kristallgitter dotiert mit Cr^{3+}

Aluminium als Al^{3+} , d.h. gibt 3
Elektronen ab

Sauerstoff als O^{2-} , d.h. nimmt 2
Elektronen auf

Im Rubinlaser sind einige
der Al^{3+} Ionen durch Cr^{3+} 
ersetzt



[wikipedia](#)

Korund-Struktur

 Al^{3+}  O^{2-}

Rubinlaser

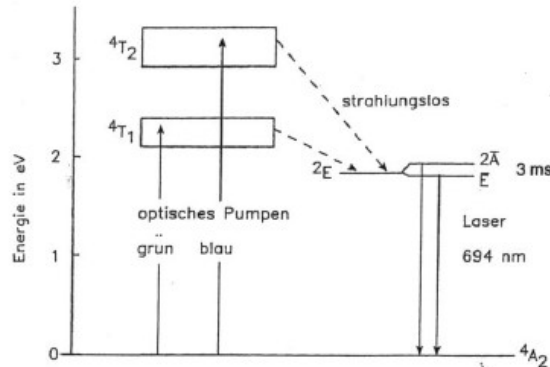


Bild 8.1. Energieniveaus und Übergänge des Rubinlasers

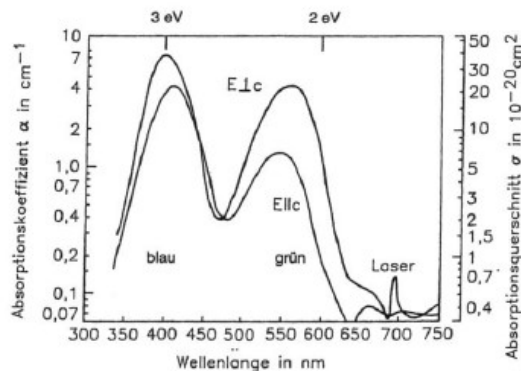
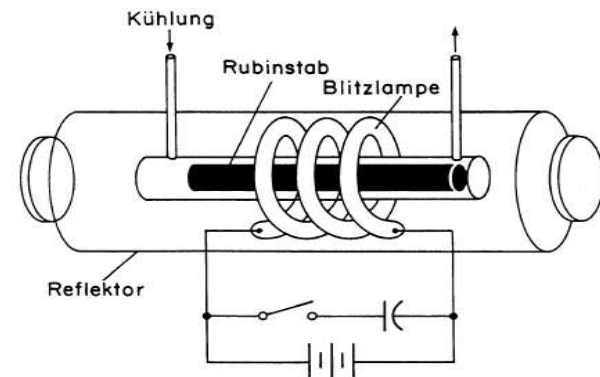


Bild 8.2. Absorptionsspektrum von Rubin ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) bei Zimmertemperatur (obere Kurve: Elektrisches Feld des Lichtes senkrecht zur c-Achse, untere Kurve: parallel) (nach Kneubühl, Sigrist und Lange)

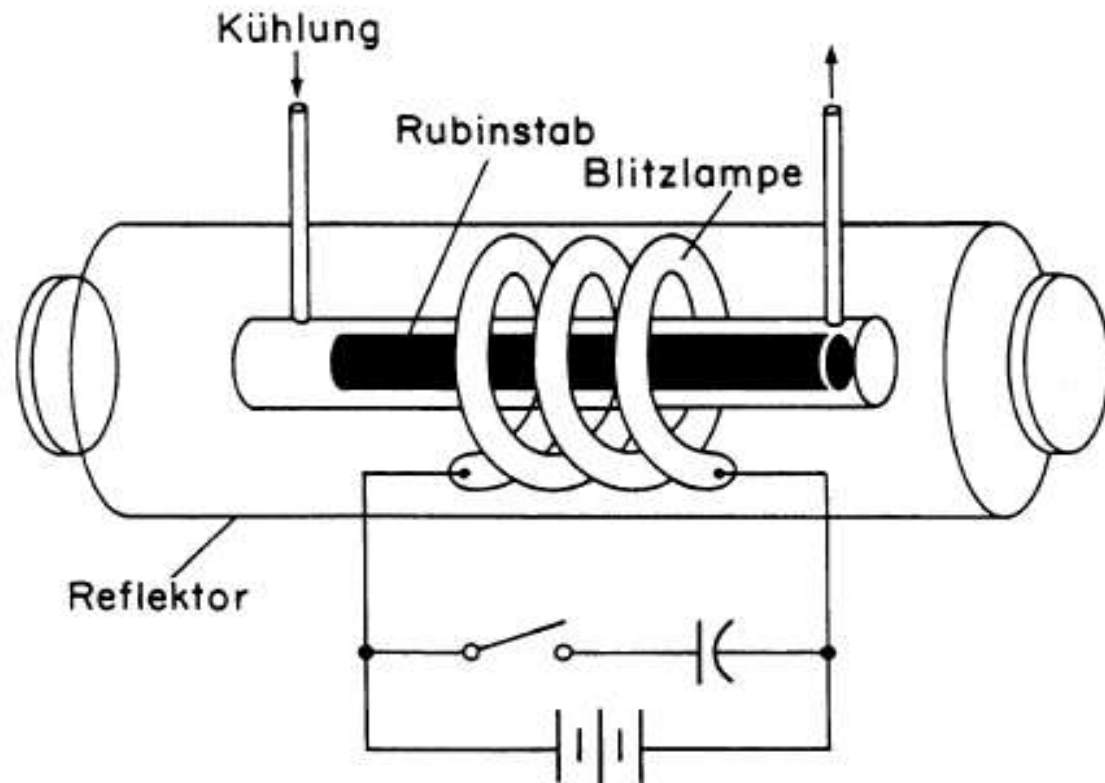
- Energieschema von Cr^{3+} im Al_2O_3 Gitter
- **Energiebänder** ergeben sich durch Einfluß von Kristallfeld und Gitterschwingungen
- **Grundzustand $4A_2$**
- **3-Niveau-Laser (unteres Laserniveau = Grundzustand)** (>50% der Cr^{3+} müssen im oberen Laserniveau angeregt sein, damit Laser startet)
 1. **Pumpen:** Optische Absorption in die breiten $4F_1$ und $4F_2$ Bänder
 2. **Relaxation:** (strahlungslos, Wärmeabgabe) in $2E$ mit den beiden Unterniveaus $2A$ und $2E$
 3. **Laserübergänge:** $2E / \underline{E} \rightarrow 4A_2$ (694,3nm) und $2E / 2A \rightarrow 4A_2$ (692,8 nm)

Abb. 16.5 Typischer Aufbau eines Rubinlasers



Rubinlaser Cr^{3+} im Al_2O_3 Gitter

Abb. 16.5 Typischer Aufbau eines Rubinlasers



Quelle: Sigrist_LaserTheorieTypenUndAnwendungen

Rubinlaser / Steckbrief / Historie

- Erste Realisierung eines Festkörper Rubin-Lasers im Jahre 1960 durch Maiman an den Hughes Research Laboratories in Kalifornien
- Aktives Medium: Al_2O_3 -Wirtskristall (Saphir) mit Chrom dotiert → $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$
- Beim Ziehen des Kristalls werden der Schmelze von Al_2O_3 etwa 0,05 Gewichtsprozent Cr_2O_3 hinzugegeben
 - Im Kristallgitter werden so pro cm^3 ungefähr 10^{19} Al^{3+} -Ionen durch Cr^{3+} -Ionen ersetzt, wodurch der Kristall seine rötliche Farbe erhält
 - Zum Vergleich Gas Laser: ca. 10^{15} - 10^{17} Laser-aktive Atome/ cm^3
 - → Hohe Verstärkung, hohe Leistung mit Festkörperlasern erreichbar
- Laserübergänge finden in den Elektronenschalen der Cr^{3+} -Ionen statt



Large Czochralski Ruby Laser Rod Section for Faceting

Brandneu

EUR 3.511,07

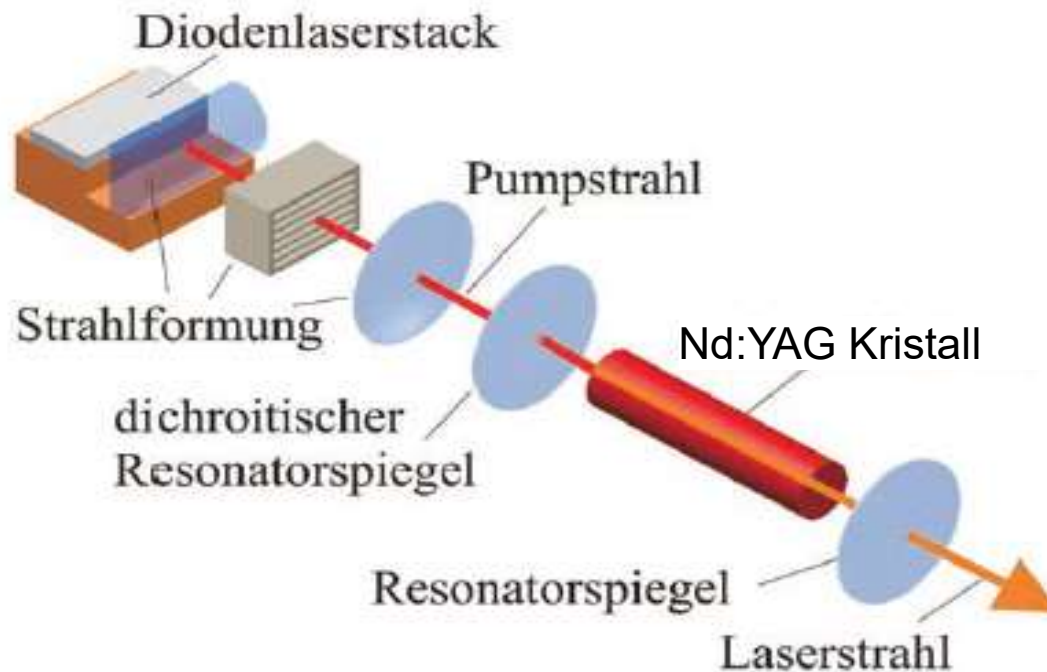
Sofort-Kaufen

+EUR 21,92 Versand

48 Beobachter

Aus Vereinigte Staaten von Amerika

Nd:YAG Laser Nd^{3+} in Yttrium-Aluminium-Granat Kristall ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, kurz YAG)



DPSS Laser

D iode
P umped
S olid
S tate

Bild 3.22 Resonatoraufbau eines endgepumpten DPSS-Lasers

Nd:YAG Laser

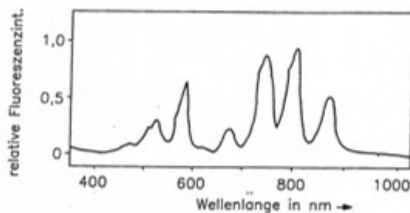
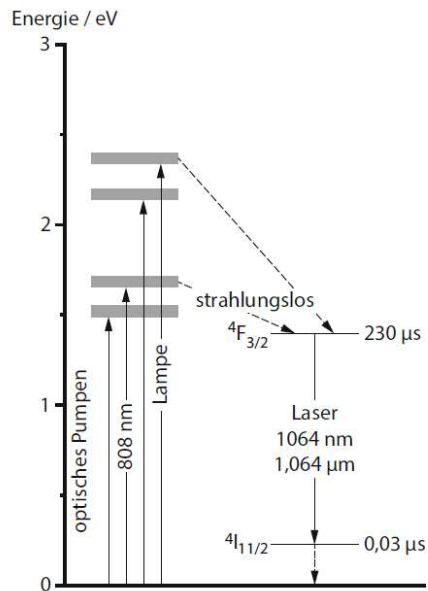


Bild 8.5.
Intensität der Fluoreszenz
von Nd:YAG bei 1,06 μm
als Funktion der Wellen-
länge des Pumplichts. 808
und 940 nm sind geeig-
nete Wellenlängen zum Pum-
pen mit Laserdioden

- Energieschema von Nd^{3+} im $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ Gitter
- **Energiebänder** ergeben sich durch Einfluß von Kristallfeld und Gitterschwingungen
- **4-Niveau-Laser:**
 1. Pumpen: Optische Absorption in verschiedene Bänder zw. 1.5 und 2.5 eV
 2. Relaxation: (strahlungslos) in das metastabile nach $^4\text{F}_{3/2}$ Niveau mit einer Lebensdauer von $230 \cdot 10^{-6}\text{s}$
 3. Laserübergang: $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ (1064nm)
 4. Relaxation in den Grundzustand

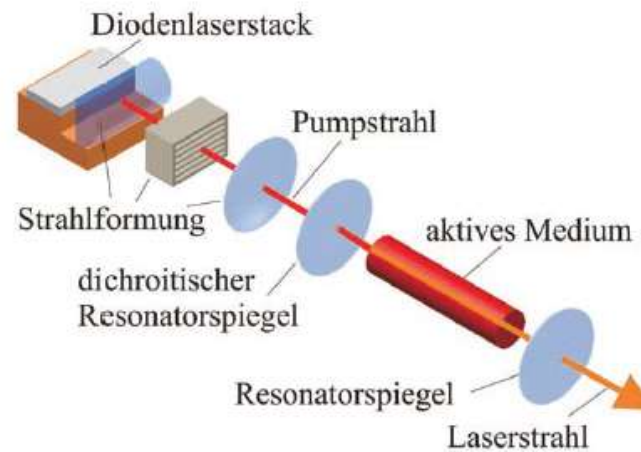


Bild 3.22 Resonatoraufbau eines endgepumpten DPSS-Lasers

Nd:YAG Laser mit
Dioden Laser gepumpt

Fachbegriff: **DPSS Laser**
= Diode Laser Pumped
Solid State

Laser-Schutz-Klassen

Laser-Schutz-Klassen



Laser-klasse	Leistung	Wellenlänge	Gefährdungspotential	Anwendung
1	Abhängig Wellenl.	400 nm bis 700 nm	Ungefährlich und augensicher	CD-, DVD-Player, Laserdrucker, Laserscanner
1M	Abhängig Wellenl.	302,5 nm bis 4.000 nm	Ungefährlich solange keine opt. Hilfsmittel	Laserdrucker, Registrierkassen
2	<1 mW	400 nm bis 700 nm	Keine Schäden, auch nicht bei opt. Hilfsm.	Ziel- und Richtlaser, Laserpointer
2M	<1 mW	400 nm bis 700 nm	Nur Kurzzeitbelastung bis 0,25 s ungefährlich	Lasereffekte, Lasershow, Laserpointer
3B	5 mW bis 500 mW	302,5 nm bis 10.600 nm	Augenschäden bei direktem Blick in den Strahl	Mess- und Einstellungslaser, Optische Übertragungstechnik
3R	1 mW bis 5 mW	302,5 nm bis 10.600 nm	Gefährlich für das Auge	Militärischer Einsatz, Zieleinrichtung, opt. Kommunik.
4	> 500 mW	302,5 nm bis 10.600 nm	Hohes Gefährdungspotential durch Laserstrahl	Materialbearbeitung