

Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 1
Gruppe 1 - Optik

1.5 Laser

Stichwörter: Laser, stimulierte Emission, Photon, Resonator, aktives Medium, Besetzungsinversion, Kohärenz, Fabry-Perot Interferometer, Beugung am Spalt.

1 Theorie

1.1 Laser-Prinzip

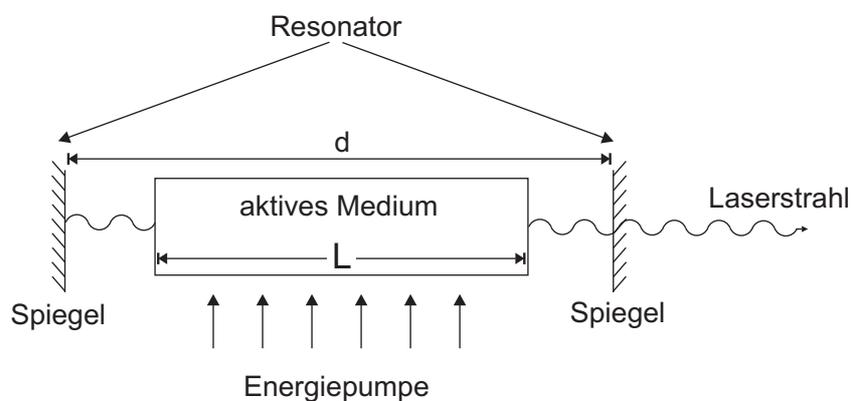


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Lasers. [1]

In diesem Versuch werden Sie einen Helium-Neon-Laser in Betrieb nehmen und die Wellenlänge und die Stabilität des Resonators bestimmen.

Der Begriff LASER steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Der grundlegende physikalische Effekt, auf dem der Laser basiert, ist die *stimulierte Emission*. Stimulierte Emission ist eine Wechselwirkung eines angeregten Atoms mit einem einfallenden Photon. Wenn das einfallende Photon eine Energie hat, die einem atomaren Übergang entspricht, dann emittiert das Atom ein weiteres Photon mit der selben Energie. Es wird in die gleiche Richtung wie das einfallende Photon emittiert. Deshalb wird durch diesen Vorgang Licht verstärkt. Da auch die Wellenlänge und Phase beider Photonen übereinstimmen, ist Laserlicht *kohärent*.

Um Lichtverstärkung durch stimulierte Emission zu erreichen, braucht man ein sogenanntes aktives Medium, das durch einen optischen Übergang eines angeregten Zustandes in einen niedrigeren Zustand Photonen erzeugt. In diesem Medium muss man durch Energiezufuhr (Energiepumpen, diese kann eine Blitzlampe, Gasentladung oder ein anderer Laser sein) eine Besetzungsinversion erzeugen. Die Besetzungsinversion ist eine Abweichung vom thermischen Gleichgewicht, in der die Besetzungsdichte N_2 eines Niveaus E_2 größer ist als die des energetisch tiefer liegenden Niveaus E_1 mit der Besetzungsdichte N_1 . Eine Besetzungsinversion kann in einem System mit mindestens drei beteiligten Energieniveaus langfristig erreicht werden (kurzzeitig kann man auch Zwei-Niveau-System Inversion erhalten, wenn die Pumpzeit kurz gegen alle Relaxationszeiten des Systems ist). Der hier verwendete He-Ne-Laser benutzt Neon als aktives Medium, welches ein Vier-Niveau-System darstellt (mehr dazu im Anhang).

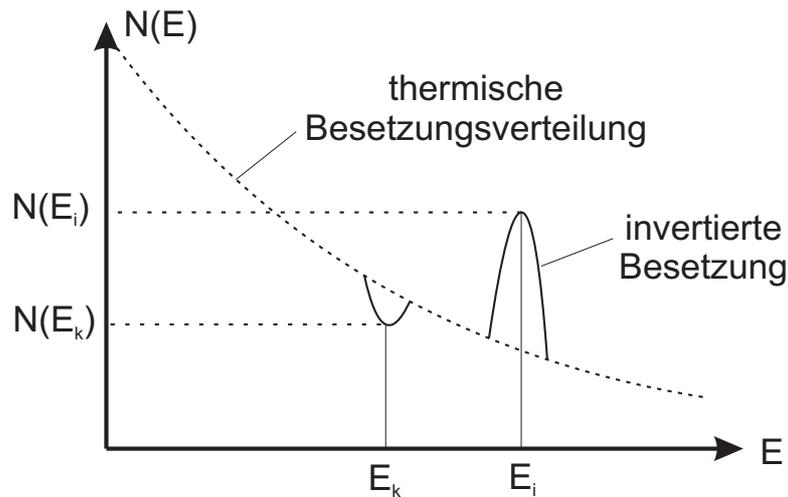


Abbildung 2: (Selektive) Besetzungsinversion. [1]

Das aktive Medium befindet sich zwischen zwei Spiegeln, dem sogenannten Resonator. Im Resonator wird Licht in wenigen Moden (stehende Wellen) mit hoher Photonendichte gespeichert. Dadurch gelangt spontan emittiertes Fluoreszenz-Licht wieder in das aktive Medium zurück. Das Zusammenwirken aus Besetzungsinversion und der Modenselektion im Resonator hat zur Folge, dass stimulierte Emission dann wahrscheinlicher als Absorption ist. Das Verhältnis aus den Wahrscheinlichkeiten für stimulierte und spontane Emission beträgt

$$\frac{W_{ik}^{stim}}{W_{ik}^{spont}} = n, \quad (1)$$

und n ist gerade die Anzahl der Photonen pro Mode. Somit wird das Fluoreszenz-Licht verstärkt. Die so emittierten zusätzlichen Photonen bewirken wiederum stimulierte Emission. Es entsteht eine Photonenlawine. Sind die Verluste kleiner als die Verstärkung, kommt es zur *Laseroszillation*. Die Laseroszillation führt zum Abbau der durch das Pumpen aufgebauten Besetzungsinversion. Ist die Abbaurate gerade so groß wie die Pumprate, findet keine Verstärkung mehr statt. Ein Laser erreicht daher eine konstante Leistung. Der Verstärkungsfaktor eines Lasers ist wie auch der Dämpfungsfaktor wellenlängenabhängig und kann durch geeignete Materialien der Spiegel gesteuert werden. Das Laserlicht enthält daher nur eine scharf definierte Wellenlänge, auch wenn es im Laser-Medium mehrere Übergänge gibt, auf denen Laserlicht emittiert werden kann.

In einem Laser bewirken Absorption, Streuung und Beugung eine Abschwächung der Lichtleistung. Absorption tritt an Spiegeln und Glasflächen auf. Inhomogenitäten im Laser-Medium und an den Glasflächen bewirken Streuung. Das vom Spiegel 1 mit Radius a reflektierte Licht hat eine Beugungsstruktur, die der einer Ringblende mit demselben Radius entspricht. Hohe Beugungsordnungen werden am Spiegel 2 vorbeireflektiert. Die Beugungsverluste werden sehr hoch, wenn die Breite der nullten Beugungsordnung den Durchmesser des zweiten Spiegels übersteigt.

1.2 Fraunhofer-Beugung

Fällt Licht auf eine Öffnung, so kommt es im Allgemeinen zu Beugungs- und Interferenzerscheinungen. Ist das einfallende Licht parallel (ebene Wellenfronten), so spricht man von *Fraunhoferbeugung*. Dies ist immer der Fall, wenn die Lichtquelle im Unendlichen liegt oder durch eine Linse dorthin „verschoben“ wird. Bei Einfall

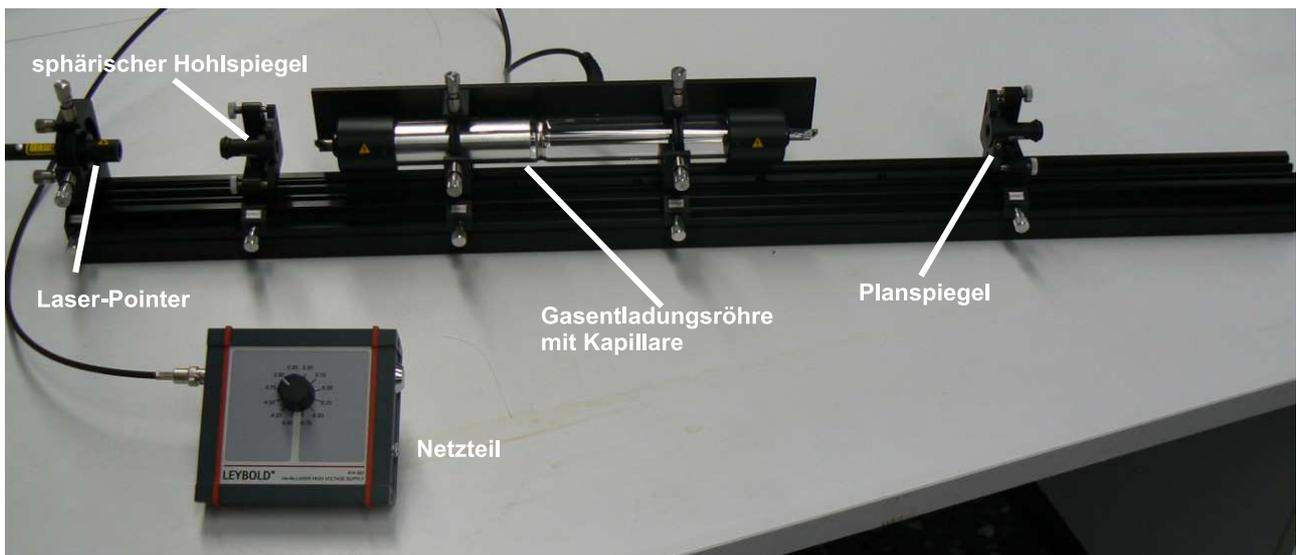


Abbildung 3: Aufgebauter He-Ne-Laser. Von links nach rechts: Laser-Pointer, Planspiegel, Gasentladungsröhre, Hohlspiegel zum Auskoppeln. Vorne: Netzteil.

von nichtparallelem Licht spricht man von *Fresnelbeugung*.

Die Theorie der Fraunhoferbeugung am Einfachspalt liefert bei Einfall von monochromatischem, kohärentem Licht für die Intensitätsverteilung I hinter dem Spalt die Beziehung

$$I = I_0 \cdot \left| \frac{\sin u}{u} \right|^2, \quad (2)$$

mit

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha). \quad (3)$$

Hierbei sind I_0 die Intensität des nullten Maximums, d die Spaltbreite, α der Winkel zur optischen Achse und λ die Wellenlänge des Lichtes. Die Intensitätsminima befinden sich bei $u_{\min} = n \cdot \pi$ bzw. bei

$$\sin \alpha = n \cdot \lambda / d \quad \text{mit} \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (4)$$

Für die Beugung an N äquidistanten Spalten gilt

$$I = I_0 \cdot \left| \frac{\sin u}{u} \right|^2 \cdot \left| \frac{\sin(N \cdot v)}{\sin v} \right|^2, \quad (5)$$

mit

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\alpha) \quad \text{und} \quad v = \frac{\pi b}{\lambda} \cdot \sin(\alpha), \quad (6)$$

wobei b der Spaltabstand, gemessen von Spaltmitte zu Spaltmitte ist.

In diesem Versuch soll Laserlicht, welches in guter Näherung parallel ist, am Einfach- und Doppelspalt gebeugt werden. Aus dem Beugungsbild kann die Wellenlänge bestimmt werden.

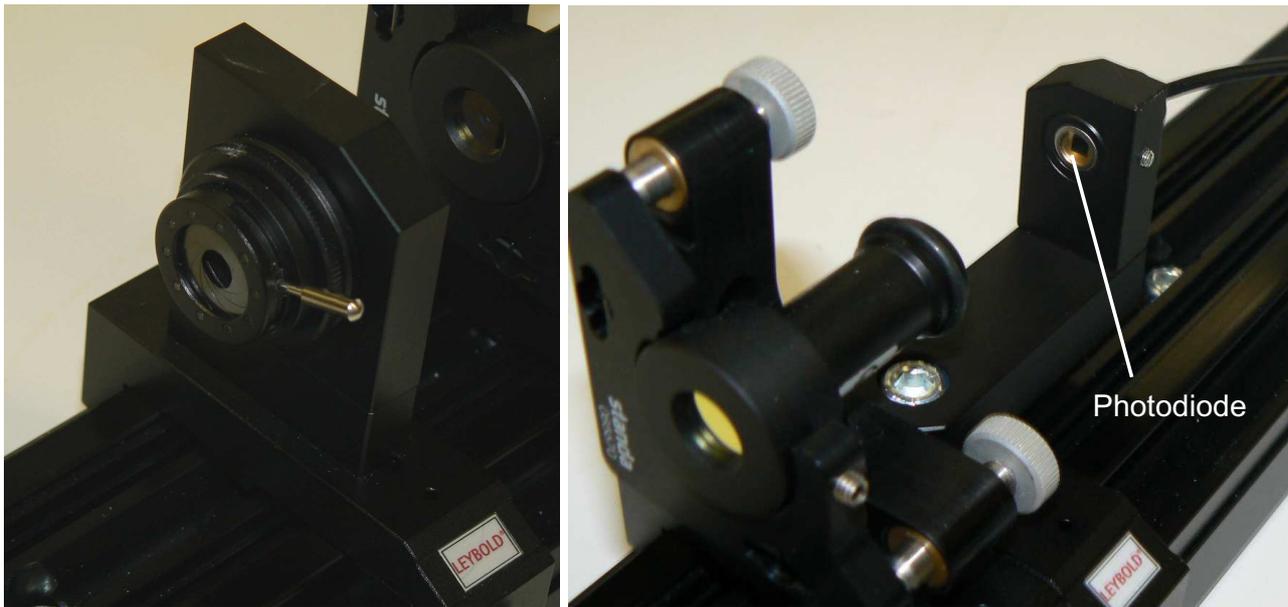


Abbildung 4: Links: Lochblende mit einstellbarem Durchmesser. Rechts: Zum Laser gehörende Photodiode, hier direkt hinter dem Hohlspiegel montiert.

2 Aufbau

Der Versuch besteht aus einer optischen Bank, einem Laser-Pointer, zwei Spiegeln, einer Lochblende und einer Gasentladungsröhre. In der Gasentladungsröhre ist eine dünne Glaskapillare, die das Helium-Neon-Gemisch enthält. Die Enden der Kapillare und auch die Spiegel dürfen nicht mit den Händen angefasst werden. Der Schweiß der Haut kann das Material beschädigen. Der Laser-Pointer erzeugt einen Referenzstrahl, den Sie mit Justierschrauben auf die optische Achse ausrichten können. Dann kann man die restlichen Komponenten nach dem Referenzstrahl einstellen. Der Aufbau ist in Abb. (3) zu sehen. Wenn Sie den Laser-Pointer ausgerichtet haben, fassen Sie ihn nach Möglichkeit nicht mehr an, da seine Ausrichtung sich leicht wieder verstellt.

Mit der Lochblende (Abb. 4) können Sie den Strahlenverlauf untersuchen. Die Gasentladung wird an einem externen Hochspannungs-Netzteil eingeschaltet und kann bei verschiedenen Entladeströmen betrieben werden. Alle Messungen in diesem Versuch werden bei einem Entladestrom von $I = 5 \text{ mA}$ durchgeführt.

Außerdem gehört zum Versuch eine Photodiode, die auf der optischen Bank des Lasers montiert werden kann (siehe Abb. 4). Mit dem Multimeter können Sie die Photospannung messen. Eine weitere optische Bank beherbergt den Objekträger mit den Einzel- und Doppelspalten sowie eine separate Photodiode zur Vermessung der Beugungs- und Interferenzbilder.

In diesem Versuch kommt ein hemisphärischer Resonator zum Einsatz, der aus einem planen Spiegel und einem sphärischen Hohlspiegel besteht (siehe Abb. 5). Der Hohlspiegel ist teilweise transparent und dient zum Auskoppeln des Laserstrahles. Die Verwendung von einem oder zwei sphärischen Hohlspiegeln im Resonator hat gegenüber der Verwendung zweier Planspiegel einen Vorteil. Bei einer leichten Dejustierung eines Planspiegels läuft der Lichtstrahl schnell aus dem Resonator hinaus. Ein sphärischer Spiegel reagiert weniger empfindlich auf Abweichungen von der optimalen Justierung.

Schauen Sie nie direkt in den Laserstrahl!
Erblindungsgefahr!

Die vom Laser emittierte Energiedichte reicht aus, die Netzhaut in dem Punkt, in dem das Licht auftrifft, irreversibel zu schädigen.

Beachten Sie auch, dass die Enden der Glaskapillare als Brewsterfenster ausgeführt sind. Dadurch wird das Laserlicht, das im Brewster-Winkel auf die Glasflächen trifft, teilweise in den Raum hineingebrochen. Schauen Sie auch da nicht hinein.

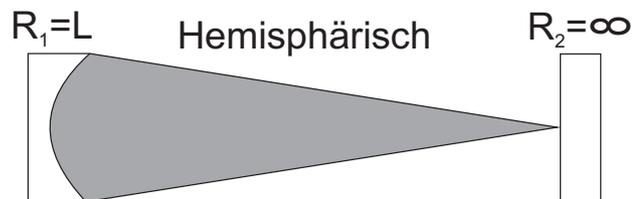


Abbildung 5: Ein hemisphärischer Resonator. [2]

3 Messungen

3.1 Aufbau des Resonators

In diesem Versuchsteil sollen Sie aus einem Planspiegel und einem Hohlspiegel mit Krümmungsradius $R = 700\text{mm}$ einen Resonator bauen. Zur Verfügung stehen Ihnen dafür die beiden Spiegel, eine Lochblende und ein Laser-Pointer. Mit Hilfe des Laser-Pointers können Sie die Ausrichtung der Spiegel und Kapillare prüfen. Die Ausrichtung der Spiegel kann mit je zwei Schrauben eingestellt werden. Der He-Ne-Laser oszilliert, wenn der Resonator korrekt eingestellt wurde und das zwischen den Spiegeln reflektierte Licht die Kapillare ungehindert durchlaufen kann. Der Abstand der Kapillare zum Planspiegel sollte kleiner sein als der zum Hohlspiegel. Überlegen Sie sich eine Methode, mit der Sie die richtige Einstellung der Spiegel und der Kapillare erreichen. Besprechen Sie die Methode mit einem Assistenten. Bauen Sie dann den Laser auf und schalten Sie die Gasentladung ein. Es ist wichtig, daß Sie die Justierung akkurat durchführen, sonst müssen Sie alles wieder abbauen und von vorne anfangen. Sollte der Laserstrahl nicht sofort erscheinen, wackeln Sie ein bisschen an den Justierschrauben des Hohlspiegels.

Wie groß darf der Spiegelabstand maximal sein, wenn der Krümmungsradius des Hohlspiegels $R = 700\text{mm}$ beträgt?

3.2 Bestimmung der Wellenlänge

1. Nehmen Sie ein Intensitätsprofil von einem Einzel- und einem Doppelspalt auf. Verwenden Sie den Einzelspalt mit $0,16\text{mm}$ Spaltbreite und den Doppelspalt mit $0,04\text{mm}$ Spaltbreite und $0,25\text{mm}$ Spaltabstand. Beim Einzelspalt berücksichtigen Sie die Minima der ersten drei Beugungsordnungen. Beim Doppelspalt nehmen Sie die Interferenzstreifen innerhalb der nullten Beugungsordnung auf. Achten Sie darauf, an den Extrempunkten des Profils genügend Messwerte aufzunehmen, damit Sie die Lage der Maxima und Minima genau bestimmen können. Dazwischen können Sie größere Messintervalle wählen. Sie können Zeit sparen, in dem Sie die Symmetrie der Intensitätsprofile ausnutzen.
2. Stellen Sie die Profile graphisch dar.
3. Stellen Sie auf demselben Graph den theoretischen Verlauf der Intensität und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse.
4. Bestimmen Sie den theoretischen Ausdruck für die Wellenlänge in Abhängigkeit der Minimastellen aus Gleichungen (2) und (5).

5. Berechnen Sie aus jedem Profil drei Werte für die Wellenlänge und den Mittelwert daraus (mit Fehlerrechnung). Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Literaturwert für die Hauptlinie des He-Ne Lasers.

3.3 Stabilität des Resonators

Ein Resonator ist stabil, wenn ein Strahl unendlich oft im Resonator umlaufen kann (perfekte Spiegel). Die Stabilität des Resonators wird anhand der Resonatorparameter g_1 und g_2 berechnet,

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad \text{und} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (7)$$

wo R_1 und R_2 die Krümmungsradien der Spiegel sind. Der Resonator ist stabil wenn

$$0 < g_1 \cdot g_2 \leq 1 \quad (8)$$

wenn $g_1 \cdot g_2 = 1$ oder $= 0$ ist, dann ist der Resonator Grenzstabil. Die Stabilität beeinflusst die Kohärenz und die Intensität des Laserstrahls positiv.

Mit der Photodiode, die auf der Laser-Bank montiert wird, und dem Multimeter, können Sie die vom Laser emittierte Leistung als Photospannung messen. Messen Sie für verschiedene Spiegelabstände von 450 mm an aufwärts die Photospannung. Verschieben Sie dazu nur den Hohlspiegel. Nehmen Sie Messwerte für $L = 450$ mm, 550 mm, 600 mm und 9 Messwerte im Intervall 600 mm, 700 mm auf. Maximieren Sie jeweils die Laserleistung durch Justieren des Hohlspiegels. Achten Sie darauf, auch jeweils das Fluoreszenz-Licht der Gasentladung zu messen, wenn der Laser nicht oszilliert. Dazu können Sie ein Blatt Papier in den Resonator halten. Erstellen Sie ein Diagramm, in dem Sie die gemessene Photospannung abzüglich der Fluoreszenz als Funktion des Spiegelabstands auftragen und erklären Sie das Ergebnis.

Literatur:

1. Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 3. Atome, Moleküle und Festkörper.*, Kap. 8, Springer Verlag, 3. Auflage. Berlin Heidelberg 2005.
2. Jürgen Eichler, Hans J. Eichler: *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen.* Springer Verlag, 6. Auflage. Berlin Heidelberg 2006.
zu Fraunhofer-Beugung:
3. Bergmann-Schaefer, Band III Optik, §§ 3.8 und 3.10 (8. Aufl.)
4. Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik.*, Kap. 10.5-10.7, Springer Verlag, 6. Auflage. Berlin Heidelberg 2004.

3.4 Anhang: Termschema und Übergänge beim He-Ne-Laser

In der Gasentladung werden Helium-Atome auf zwei *metastabile* Niveaus angeregt. Metastabile Niveaus können nicht durch Lichtemission in Zustände niedrigerer Energie übergehen (quantenmechanisch verboten). Sie haben daher eine lange mittlere Lebensdauer. Deshalb können die angeregten Helium-Atome ihre Energie durch Stöße auf Neon-Atome übertragen. Diese zwei Prozesse erzeugen die Besetzungsinversion im Neon-System, da die Niveaus 3s und 2s selektiv bevölkert werden.

Den mit Abstand größten Verstärkungsfaktor von 10 weist die Hauptlinie mit $\lambda = 632,8\text{ nm}$ auf. Nach Laserübergängen fallen die Neon-Atome auf das metastabile Niveau 2p zurück. Durch Kollision mit der Wand der Kapillare verlieren sie ihre restliche Anregungsenergie und gelangen in den Grundzustand zurück.

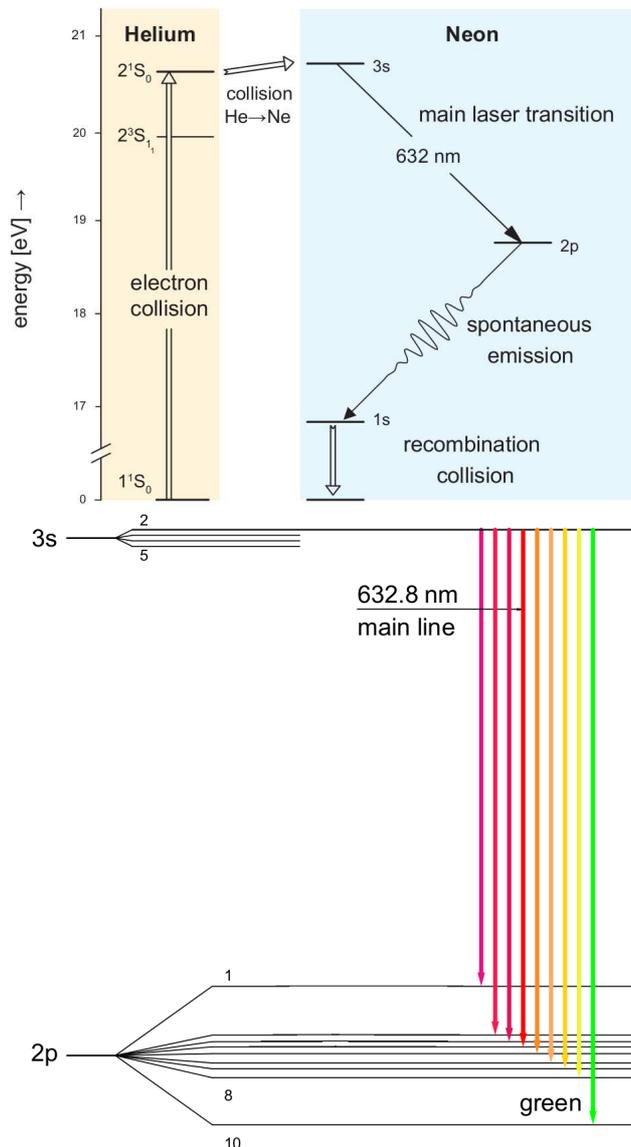


Abbildung 6: Oben: Schema der Energiezufuhr in das Helium-Neon-System mit der Laser-Hauptlinie von $632,8\text{ nm}$. Unten: Die wichtigsten Laserübergänge im Neon. Neon hat mehr als 200 Laserübergänge.