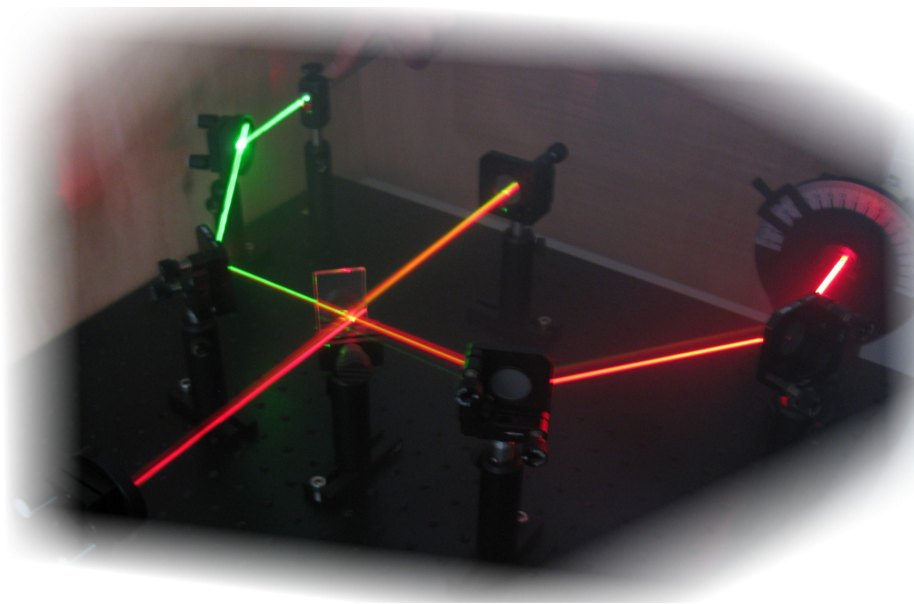


PSI

die

Physik–Schülerlabor-Initiative



Der Superstrahler

Version ohne eingebettete Animationen

LASER sind heute für Schüler Gegenstände des Alltags, teils ist das Laserlicht direkt sichtbar – wie z.B. bei Barcodelesegeräten an Kassen, Laserpointern, Laserlichtshows in Diskotheken – teils sind die Laser so in die Geräte eingebaut, dass man sie gar nicht mehr wahrnimmt – wie z.B. in Laserdruckern, Lese- und Schreibgeräten von optischen Medien, wie z.B. CD, DVD und Blu-ray discs.

Aus dem Physikunterricht in der Oberstufe sind Laser auch nicht mehr wegzudenken, in den meisten Versuchen zum Thema Interferenz werden Laser als kohärente Lichtquellen benötigt.

Trotz alledem sind Laser für die Schüler eine Black Box, das PSI will mit dem Versuch „Der Superstrahler“ einen Zugang zum Verständnis eines Lasers bieten.

Es handelt sich dabei um einen Stickstofflaser, das lasernde Medium ist also Stickstoff, der Aufbau kann bereits sehr einfach realisiert werden, wie das folgende Photo des Prototyps zeigt.



Abbildung 1: Prototyp des Stickstofflasers

Der Stickstofflaser funktioniert bereits mit diesem rudimentären Aufbau, den man TEA (engl. transverse electric-discharge at atmospheric pressure) nennt, allerdings wurde dieser erste Prototyp für das PSI in zweierlei Hinsicht verbessert:

Erstens wurden die Elektroden in eine Vakuumkammer aus Plexiglas eingebaut, so dass als laserndes Medium statt Luft auch reiner Stickstoff bei erniedrigtem Druck verwendet werden kann, diesen Aufbau nennt man TE (transverse electric-discharge).

Zweitens wurde der gesamte Aufbau samt den Kondensatoren mit Plexiglas umgeben, so dass der Laser auch im Hinblick auf die benötigte Hochspannung sicher betrieben werden kann. Die folgende Abbildung zeigt den Stickstofflaser in Laseraktivität, wie er im PSI steht:

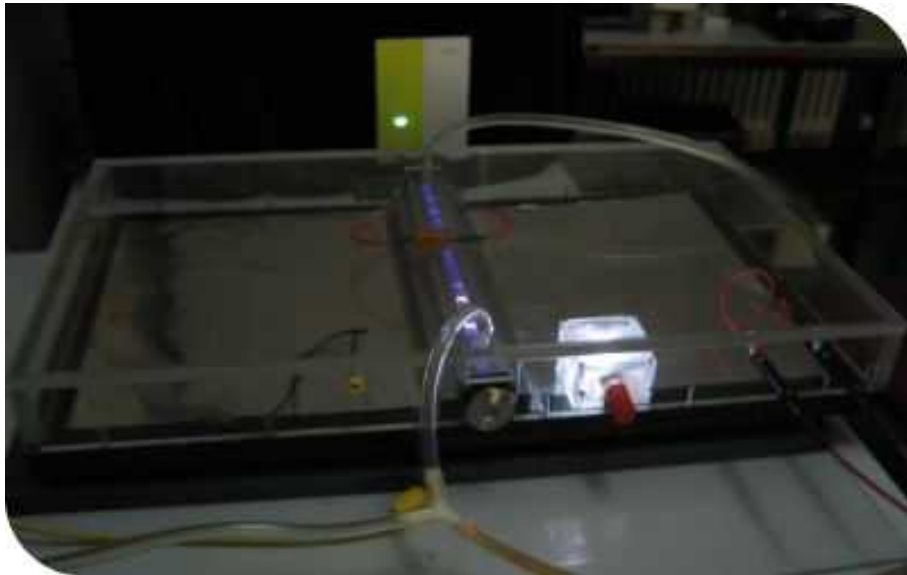


Abbildung 2: Der Stickstofflaser im Schülerlabor

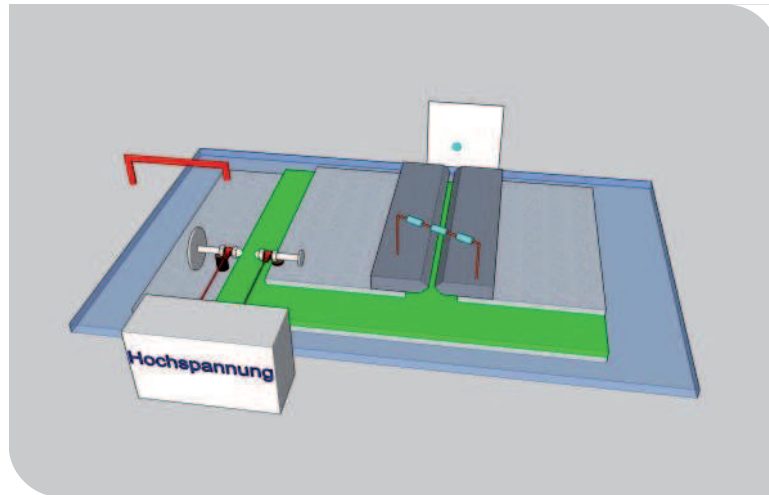
1 Aufbau des Superstrahlers

Das zentrale Bauteil besteht aus zwei (Band-)Elektroden aus Aluminiumplatten (dunkelgrau eingezeichnet), zwischen denen elektrische Entladungen stattfinden. Dabei werden durch Elektronenstöße Stickstoffmoleküle energetisch angeregt, was elementar für das Funktionieren des Lasers ist.

Der Rest des Aufbaus dient dazu, den für die elektrische Entladung notwendigen schnellen Stromanstieg bei hoher Spannung zu erreichen.

Die folgende Animation zeigt schematisch den Aufbau des Lasers.

Laser wird mit Papier sichtbar gemacht



PSI - Die Physik-Schülerlabor-Initiative

© Sven Röhrner

Animation 1: Aufbau des Stickstofflasers

Auf einer Glasplatte – die nur zur elektrischen Isolation des Aufbaus gegen die Arbeitsunterlage dient – wird eine geerdete Aluminiumfolie gelegt, sie dient als untere Kondensatorplatte.

Darauf wird eine Kunststofffolie gelegt, diese dient als Dielektrikum. Im ersten Prototyp war dies einfach eine Kopierfolie, die später aber durch eine für diese Zwecke (bezüglich Durchschlagfestigkeit, Dichte etc.) besser geeignete Folie ersetzt wurde, diese ist – wie in der Animation – grün.

Darauf werden zwei Aluminiumfolien gelegt, sie dienen jeweils als obere Kondensatorplatten, sie liegen im Abstand von etwa 3 cm zueinander.

Auf jede dieser beiden Folien wird je eine Aluminiumplatte gelegt, der Raum zwischen den beiden Platten stellt die eigentliche Laserkammer dar, also den Ort, an dem sich das lasernde Medium – der Stickstoff – befindet.

Beim TE-Laser ist die „Laserkammer“ einfach nur der Spalt zwischen den Elektroden. Die beiden Elektroden werden über einen Widerstand elektrisch leitend miteinander verbunden.

Eine der beiden oberen Aluminiumfolien und die untere Aluminiumfolie werden über eine Funkenstrecke verbunden, diese besteht aus zwei genau aufeinander zeigenden Hutmuttern.

An die Schrauben wird eine Hochspannung angelegt.

2 Funktionsweise des Stickstofflasers

Die Funktionsweise lässt sich in wenigen Sätzen erläutern.

Durch eine elektrische Entladung zwischen den zwei Elektroden werden Stickstoffmoleküle angeregt. Gehen einige der Moleküle in den Grundzustand über, wird jeweils ein Photon ausgesandt, diese treffen auf andere – noch angeregte – Stickstoffmoleküle, welche daraufhin auch in den Grundzustand übergehen, dabei wird jeweils ein weiteres Photon ausgesandt. Es kommt so zu einer lawinenartigen Vermehrung der Photonen, diese besitzen – aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte – alle die gleichen Eigenschaften, das entstehende Licht ist also monochromatisch und kohärent.

Nach dieser prinzipiellen Erklärung soll die Funktionsweise nochmals ausführlich beleuchtet werden:

Zunächst werden die beiden Kondensatoren geladen, d.h. die beiden Elektroden – welche ja jeweils einen Teil der oberen Kondensatorplatten darstellen – sind auf dem gleichen Potential, durch eine Entladung an der Funkenstrecke wird jedoch die linke Elektrode schlagartig entladen.

Es besteht nun also eine große Potentialdifferenz zwischen den Elektroden, auch hier kommt es zu einer elektrischen Entladung zwischen den beiden Elektroden, beginnend an der Stelle, an denen sie sich am nächsten sind.

Die zwischen den Elektroden überspringenden Elektronen stoßen mit den Stickstoffmolekülen zusammen, dadurch werden diese energetisch angeregt.

Die angeregten Stickstoffmoleküle können auf zwei Arten die aufgenommene Energie wieder abgeben, einerseits durch Stöße mit anderen Molekülen, andererseits durch Abgabe elektromagnetischer Strahlung, oder anders ausgedrückt: Sie senden Photonen aus.

Trifft ein solches Photon auf ein noch angeregtes Stickstoffmolekül so findet eine stimulierte Emission statt, d.h. das Photon stimuliert das Molekül, ein weiteres Photon auszusenden.

Befinden sich sehr viele Atome in einem angeregten Zustand, so wächst die Zahl der Photonen durch diese Verstärkung lawinenartig an.

Das Licht wird vor allem parallel zu den Elektroden ausgesandt, da ein Photon, das sich parallel zu den Elektroden bewegt eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit hat, auf ein angeregtes Stickstoffmolekül zu treffen, weil ja hier die Entladung stattfindet.

Liegen die Elektroden nicht exakt parallel zueinander, so beginnt die Gasentladung und damit die Lasertätigkeit theoretisch dort, wo die Elektroden enger zusammen liegen und wandert dann die Elektroden entlang.

In der Praxis kann man aber auch einfach einen Spiegel auf einer Seite aufstellen, so dass das Laserlicht wieder zurück in die gewünschte Richtung reflektiert wird.

Während bei einem Laser im eigentlichen Wortsinn die Photonen nach der Reflexion am Spiegel nochmals durch induzierte Emission verstärkt werden, ist dies bei „Stickstofflasern“ nicht der Fall, daher spricht man bei unserem Aufbau fachlich korrekt von einem Superstrahler.

Warum jedoch findet auf dem Rückweg keine Verstärkung statt?

3 Genauere Betrachtung der Vorgänge im Stickstoffmolekül

Um zu erklären, warum die Photonen auf dem Rückweg nicht mehr auf angeregte Stickstoffmoleküle treffen, müssen die Vorgänge im Stickstoffmolekül genauer betrachtet werden.

Ein Stickstoffmolekül kann in verschiedenen Energiezuständen vorliegen, im Schema beispielhaft durch die drei Potentialkurven dargestellt.

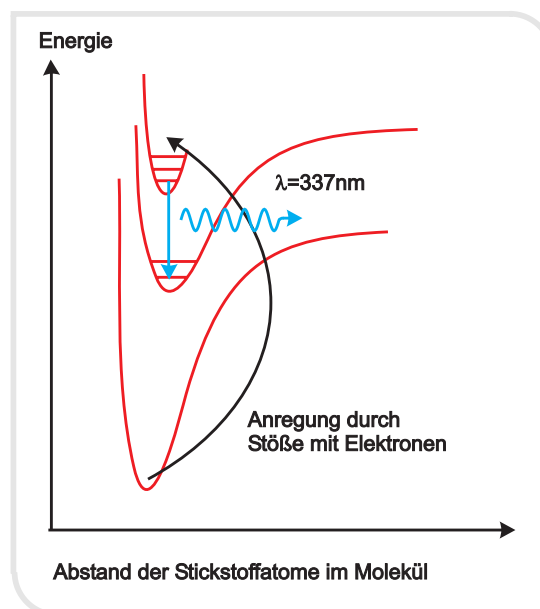


Abbildung 3: Molekülpotential eines Stickstoffmoleküls

Durch Aufnahme von Energie gehen die Stickstoffmoleküle von einem niedrigeren in einen höheren Energiezustand über, bzw. durch Abgabe von Energie von einem höheren in einen niedrigeren Zustand.

Die Auf- bzw. Abnahme von Energie kann durch verschiedene Prozesse verursacht werden, zum Beispiel Stöße mit anderen Teilchen, wie Elektronen, aber auch anderen Molekülen oder Absorption bzw. Emission von Photonen.

Beim Stickstoffmolekül bewirken z.B. Stöße mit Elektronen den Übergang vom Grundzustand in den zweiten angeregten Zustand.

Dieser Zustand ist kurzlebig – oder mit anderen Worten nicht stabil – die Energie wird bevorzugt durch Emission eines Photons abgegeben, das Stickstoffmolekül geht dabei in den ersten angeregten Zustand über.

Der erste angeregte Zustand ist relativ stabil, d.h. es dauert lange, bis das Stickstoffmolekül in den Grundzustand relaxiert.

Dies ist genau der Grund, warum die Photonen auf ihrem Rückweg vom Spiegel nicht mehr auf angeregte Stickstoffmoleküle treffen: Diese benötigen nach der Emission eines Photons relativ lange (länger als das Photon zum Spiegel und zurück braucht), um wieder in den zweiten angeregten Zustand zu gelangen, da der Umweg über den Grundzustand nötig ist.

Der Stickstofflaser ist also ein gepulster Laser, d.h. Lasertätigkeit bricht nach kurzer Zeit (Nanosekundenbereich) wieder ab (self termination). Die Lebensdauer der Energiezustände ist druckabhängig, die Änderung des Drucks wirkt sich auch noch anderweitig aus (siehe nächster Abschnitt 4), der Superstrahler arbeitet deshalb bei erniedrigtem Druck.

4 Vom TEA- zum TE-Laser

Der Prototyp unseres Lasers arbeitet bei Normaldruck (ist also ein TEA-Laser, TEA steht für „transverse electric-discharge at atmospheric pressure“), der verbesserte Aufbau ist ein TE-Laser (TE steht für „transverse electric-discharge“), d.h. die Elektroden befinden sich in einer Vakuumkammer, diese bietet mehrere Vorteile:

- da die Laserkammer abgeschlossen ist, kann auch reiner Stickstoff verwendet werden, dadurch erhöht sich die Leistung des Lasers
- angeregte Stickstoffmoleküle können die aufgenommene Energie auch durch Stöße mit anderen Molekülen verlieren, bei verringertem Druck ist es weniger

wahrscheinlich, dass dies passiert, somit wird wiederum die Leistung des Lasers erhöht. (Der Druck kann natürlich nicht beliebig verkleinert werden, schließlich müssen auch noch Stickstoffmoleküle vorhanden sein, die lasern können, der beste Kompromiss liegt bei unserem Laser bei etwa 120 mbar.)

- die Spannung, bei der eine Gasentladung zwischen den Elektroden stattfindet, hängt von zwei Faktoren ab, nämlich dem Abstand zwischen den beiden Elektroden und dem Druck des Gases.

Je geringer der Druck ist, umso weiter können die Elektroden auseinander liegen, damit es noch zum Überschlag kommt, bei einem größeren Abstand der Elektroden fallen dann kleinste Unebenheiten an den Elektroden nicht mehr so ins Gewicht.

Der TEA-Laser ist aus diesem Grund schwieriger zu justieren, hier liegen die Elektroden nur 1 bis 2 mm auseinander, sind sie nicht perfekt glatt, wird die Gasentladung gestört.

Der TE-Laser benötigt eine Vakuumkammer, ist aber von der Justage einfacher und hat mehr Leistung.

L 5 Absorption und (spontane) Emission

Bei der atomistischen Deutung der Absorption und Emission von Licht können drei Prozesse unterschieden werden.

- Absorption
- spontane Emission
- stimulierte Emission

Der Prozess der Absorption und der spontanen Emission wird im folgenden erläutert, auf die stimulierte Emission wird gesondert eingegangen.

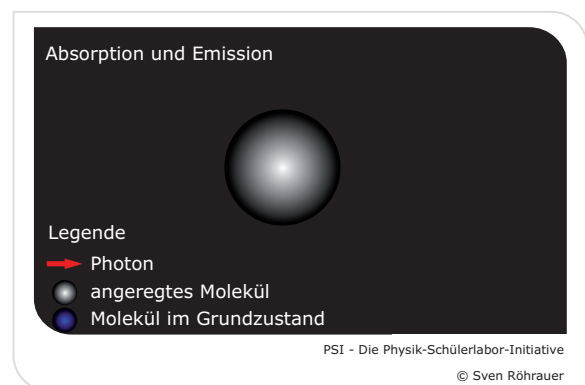
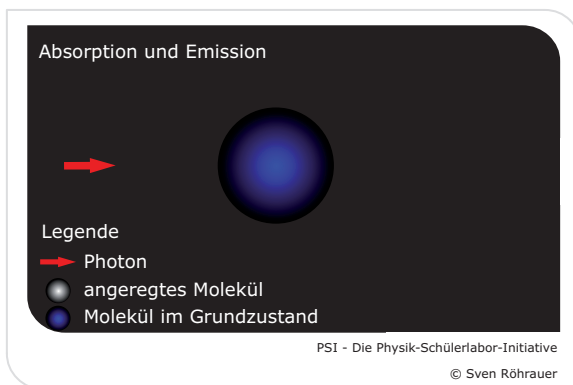
L 5.1 Absorption

Ein Molekül (oder Atom) kann verschiedene Energiezustände einnehmen. Ein Photon kann genau dann absorbiert werden, wenn das Photon gerade die Energie trägt,

die der Differenz zweier Energiezustände entspricht. Nach der Absorption eines Photons befindet sich das Molekül in einem höheren – einem so genannten angeregten – (Energie-)Zustand (siehe dazu auch Animation 2).

L 5.2 Spontane Emission

Ein angeregtes Molekül kann die aufgenommene Energie auch wieder in Form eines Photons abgeben. Auch hier zeigt sich wieder der statistische Charakter der Quantenmechanik: Für ein einzelnes Molekül lässt sich nicht voraussagen, wann es in den Grundzustand zurückfällt, man kann lediglich eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben.

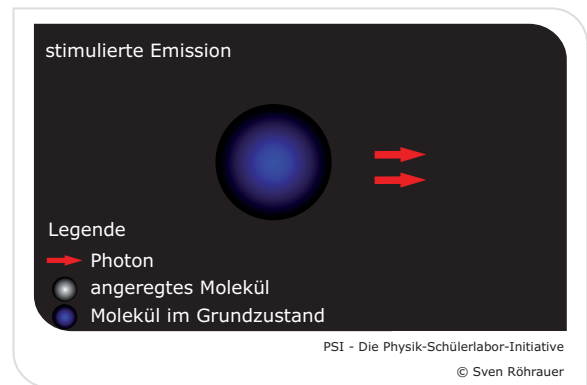
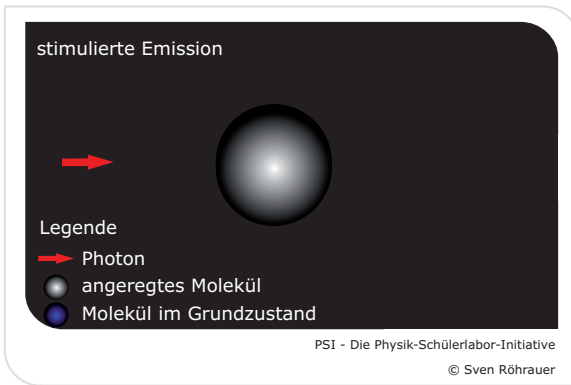


Animation 2: Absorption und spontane Emission

L 6 Stimulierte Emission

Befindet sich ein Molekül in einem angeregten Zustand, so kann es durch ein Photon stimuliert werden, in den Grundzustand überzugehen und dabei ein Photon auszusenden, es kommt also zu einer Verstärkung.

Das stimulierende Photon muss dabei genau die Energie tragen, die das Molekül in Form eines Photons abgeben kann. Das Besondere an der induzierten Emission ist also, dass die beiden Photonen – das stimulierende und stimulierte – dieselben Eigenschaften besitzen, d.h. das durch induzierte Emission entstehende Licht ist monochromatisch und kohärent.

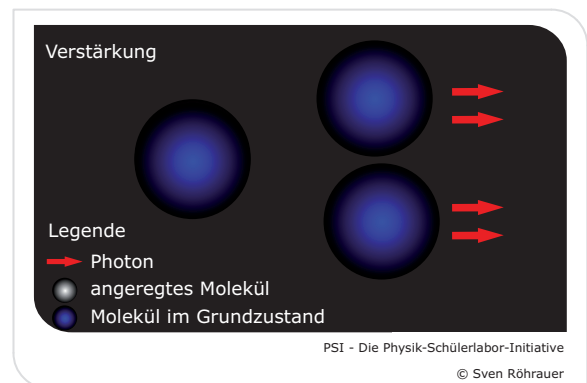
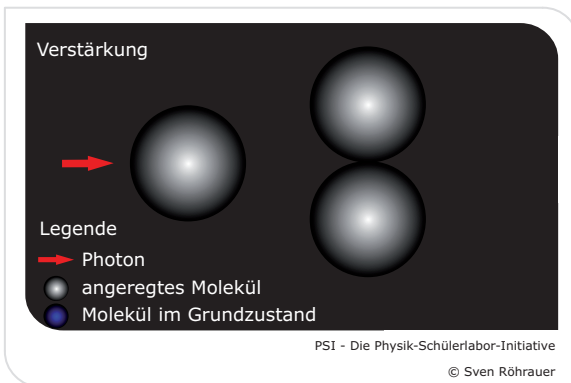


Animation 3: Stimulierte Emission

Die induzierte Emission führt also zu einer Verstärkung des Lichts, dieser Vorgang ist von entscheidender Bedeutung für das Funktionieren eines Lasers.

L 7 Verstärkung

Licht kann unter Ausnutzung des Phänomens der stimulierten Emission verstärkt werden, indem wenige Photonen auf viele energetisch angeregte Atome treffen und es zur vielfachen stimulierten Emission kommt, welche die Zahl der Photonen lawinenartig anwachsen lässt.



Animation 4: Verstärkung

Voraussetzung für die Verstärkung ist jedoch eine Besetzungsinversion, d.h. dass mehr Atome in einem angeregten Zustand sind, als im Grundzustand.

Betrachtet man ein Zwei-Niveau-System, d.h. das Atom kann sich im Grundzustand oder in nur einem angeregten Zustand befinden, so stellt man fest, dass eine Besetzungsinversion nicht erreichbar ist, da die beiden Niveaus selbst bei starker Energiezufuhr im thermischen Gleichgewicht maximal gleich besetzt sind.