

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Prinzip des Lasers	3
-Grundlagen	3
-Anregung	4
-Absorption	4
-Spontane Emission	5
-Stimulierte Emission	6
-Inversion	7
-Energiezufuhr	9
-Resonator	10
-Zukunft der Laser-Entwicklung	11
3. Ein N <sub>2</sub> -Superstrahler	12
-Theorie	12
-Praxis	14
-Schlusswort	15
4. Quellennachweis	16
5. Anhang	17

## 1. Einleitung

Das Interesse an der Physik war es die mich schon vor einigen Jahren, das erste mal in die „Berührung“ mit einem Laser brachte. Es war so zu der Zeit als es die handelsüblichen „Laserpointer“ noch nicht gab, als Frau Prof. Anders-von Ahlften, mir einen kleinen HeNe Laser zeigte, den sie von der Uni-Hannover mitgebracht hatte. Die Begeisterung bei mir und meinem älterem Bruder war natürlich groß, schließlich konnte man die Petrikirchturm kugeln anleuchten oder mit Zigarettenrauch den roten Strahl sichtbar machen. Meinen Bruder hat es seit dem nicht mehr los gelassen, und so hatten wir vor ca. 3 Jahren einen eigenen Luftgekühlten Argon Laser im Keller stehen. Die Laserleistung lag bei dem schon bei ~150mW, eine erste Lasershow musste gleich damit gemacht werden, und so ist mein Bruder nun zu einem Laserspezialisten geworden, der Professionelle Lasershows für Groß-Veranstaltungen anbietet.

( [www.LaserFabrik.de](http://www.LaserFabrik.de) )

Doch was hinter dem Laser steckt habe ich mir zu der Zeit erst anlesen müssen, weil die Physikalischen Grundlagen nicht direkt aus der Konstruktion ersichtlich sind. Interessant vor allem aber ist, wie stark die Laser mittlerweile in unser Gesellschaft verbreitet sind, die Halbleiter Laser finden immer neue Anwendungs-Gebiete in der Datenspeicherung und Übermittlung. Immer neue Materialien lassen sich anregen, und immer kleiner und effektiver werden die Geräte. Doch das Prinzip ist grundsätzlich das gleiche, alle Laser, ob fest oder gasförmig basieren auf der gleichen „alten“ Idee.

Diese theoretische Grundlage, und das tieferliegende Prinzip einer angeregten Emission, soll Thema dieser Facharbeit sein.

## 2. Prinzip des Lasers

### *-Grundlagen*

Ein Laser besteht grundsätzlich aus dem Lasermaterial, der Anregungsquelle und einen Resonator. Wie aber kommt es nun zu Laserstrahlung? Die Grundlage dafür ist erst mal die stimulierte Emission. Sie entsteht durch Anregung des Lasermaterials, genauer: der Atome oder Moleküle des betreffenden Materials.

Die Atome selbst bestehen aus noch kleineren Teilchen, dem positiv geladenem Kern, und die sich darum bewegendem negativen Elektronen. Nach dem Atom Modell von Niels Bohr, können die Elektronen aber nur ganz bestimmte Entfernungen vom Atomkern einnehmen.

Wenn die Elektronen in ihrem Grundzustand Energie aufnehmen, können sie eine höhere Umlaufbahn erreichen, diese Umlaufbahnen sind aber beschränkt, in bestimmte *Stufen*. So muss immer eine bestimmte Menge Energie aufgenommen werden um die nächst höhere Stufe zu erreichen. Diese bestimmte Energie Menge ist fundamental, man sagt auch die Energie ist *gequantelt*. Bei jeder Atomsorte ist diese Energie einwenig unterschiedlich, man braucht also immer eine andere Menge an Energie um die Elektronen auf ein höheres (Energie-)Niveau zu bekommen. Auch ist der Abstand zwischen verschiedenen Niveaus nicht immer gleich, so wird der Abstand zwischen den Stufen immer kleiner, je höher die Gesamt Energie ist.

Nun braucht man für Gas-Laser eine genau abgestimmte Anregungs-Energie, um die Elektronen in das gewünschte Niveau zu bringen. Betrachtet man nun Molekül-Laser (z.B. CO<sub>2</sub>-Laser), so gibt es ein starkes Zusammenspiel zwischen den Atomen der Moleküle, und den Energie-Niveaus jedes Atoms. Es entstehen sogenannte *Vibrationszustände*, bewirkt durch die Schwingungen der Atome innerhalb der Moleküle gegeneinander. Diese Vibrationszustände sind dann als kleinere Stufen, zwischen den Haupt Niveaus bemerkbar.

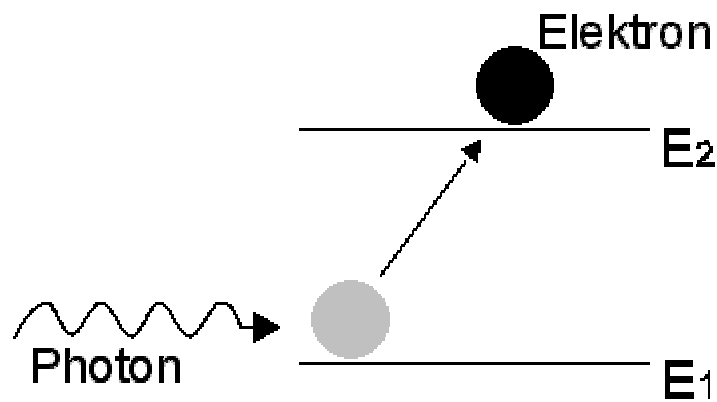
Benutzt man Festkörper als Laser-Material (z.B. Rubin), so sind diese Übergangszustände noch ausgeprägter, es handelt sich dann um so genannte *Energiebänder*, in diesen kann das Elektron dann „fließend“ gebracht werden, also es kann mit nicht so präzisen Energie Stößen auf ein höheres Niveau gebracht werden.

*-Anregung*

### 1. Absorption:

Lässt man nun Licht auf unser Material einstrahlen, dessen Photonen genau soviel Energie haben wie für die Energie Niveaus gebraucht werden, so können Elektronen auf ein höheres Niveau gelangen.

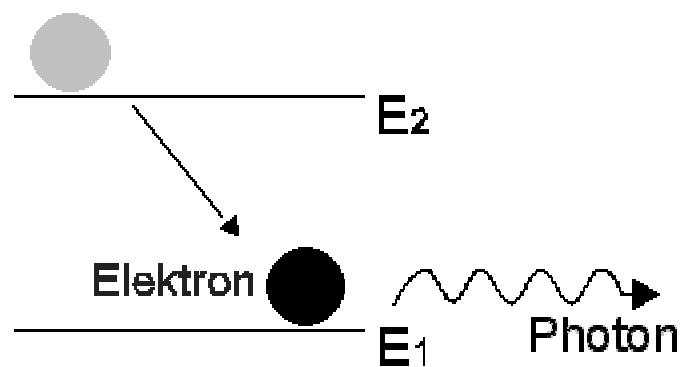
Das Atom nimmt also ein Photon einer bestimmten Wellenlänge, bzw. Frequenz auf, absorbiert es. Die Wellenlänge des Photons ist ein Maß für die Energie des Photons, und bestimmt somit ob ein Elektron auf ein höheres Niveau gelangt oder nicht, weil Energie des Photons und die gebrauchte Energie für die nächst höhere Stufe müssen übereinstimmen, ansonsten wird das Photon nicht absorbiert.



## 2. Spontane Emission

Im angeregten Zustand verweilt das Elektron nur ca.  $10^{-8}$ s. Dann springt es von alleine wieder in den nicht angeregten Zustand zurück. Die aufgenommene Energie wird natürlich wieder frei, in Form eines Photons, das zwar dieselbe Wellenlänge besitzt wie vorher aber in eine beliebige Richtung ausgesendet wird.

Alle normalen Lichtquellen funktionieren auf Grund der Spontanen Emission, und senden deshalb Licht in vielen Frequenzbereichen aus, und dieses wahllos in jede Richtung.



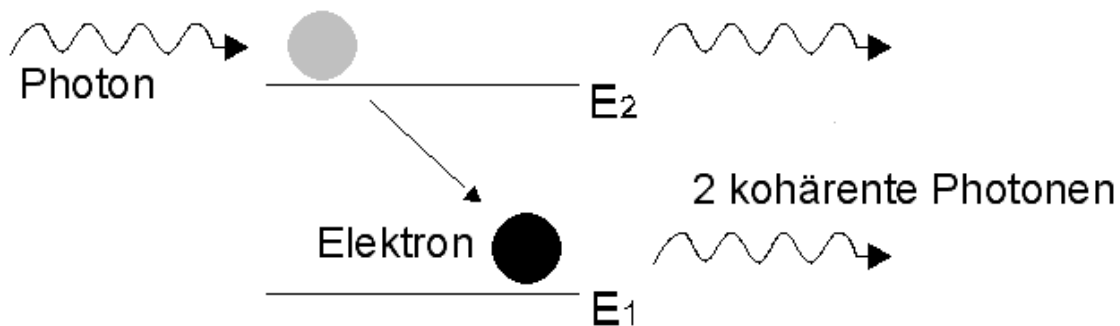
### 3. Stimulierte Emission

Wird nun auf das bereits angeregte Elektron ein Photon das genauso beschaffen ist wie das erste eingestrahlt, so kann dieses zweite Photon das Elektron dazu veranlassen, sein erhöhtes Niveau zu verlassen, und dabei ein Photon freizusetzen. Dieses freigesetzte Photon stimmt sowohl in Ausstrahlrichtung, Phase, als auch Wellenlänge mit dem anderem überein, das emittierte Licht wird also intensiver.

Diese zwei Photonen können nun wiederum 2 im angeregtem Zustand befindlichen Atome stimulieren und zur Emission anregen, sodass sich ein selbst verstärkender Lichtstrahl durch unser Lasermaterial ausbreitet.

Ein Laser ist also nicht mehr als ein durch Angeregte Emission verstärkter Lichtstrahl.

Kurz LASER, engl. Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation.



## **-Inversion**

Eine Lawinenartige Ausbreitung des Lichts und somit der Verstärkung wäre natürlich Ideal. Da aber Emission und Absorption konkurrieren, ist dies nicht so einfach zu erreichen. Wie aber bekommen wir einen nahezu ideal Zustand hin ?

Man muss also dafür sorgen das immer mehr Elektronen im angeregtem Zustand sind als im nicht angeregtem. Es muss eine Umkehrung in der Energie Niveau Besetzung geben. Diese wichtige Voraussetzung nennt man *Inversion*. Um dieses Energie Ungleichgewicht aufrecht zu erhalten ist eine stetige Energie Zufuhr notwendig. Ständig muss *gepumpt* werden, denn die Elektronen sind bestrebt immer in ihren Grundzustand zurück zukehren. Nach der „Boltzmann-Verteilung“ werden die Energie Niveaus „verteilt“, auch bei unendlich hohen Temperaturen sind maximal so viele Elektronen im angeregtem Zustand wie Elektronen im Grundzustand. Bei Raumtemperatur ist das untere Niveau natürlich immer unterbesetzt, so dass die Absorption begünstigt wird.

Die spontane Emission die dem Laserprozess entgegenwirkt hängt stark von der Frequenz die gewünscht wird ab. Bei höheren Frequenzen wird es immer schwerer eine Inversion zu erzeugen, weil die Abstände zwischen den Energie Niveaus immer größer werden, die Elektronen lassen sich nicht mehr so leicht anregen.

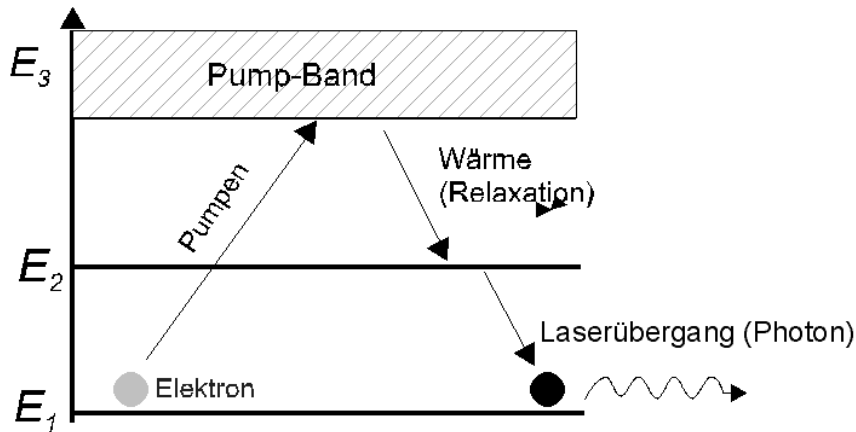
Mit einem solchen *2-Niveau-System* ist es daher nur noch so gerade möglich einen Laser im Mikrowellen Bereich herzustellen. Doch wie schon gesagt sind hier maximal gleich viele Elektronen im Oberem wie im Unterem Niveau.

Da aber eine Inversion für einen andauernde Strahlung unerlässlich ist, muss man diese anders Technisch realisieren. Praktisch entfernt man einfach die Elektronen aus dem unterem Niveau mit Hilfe von starken elektrischen oder magnetischen Feldern.

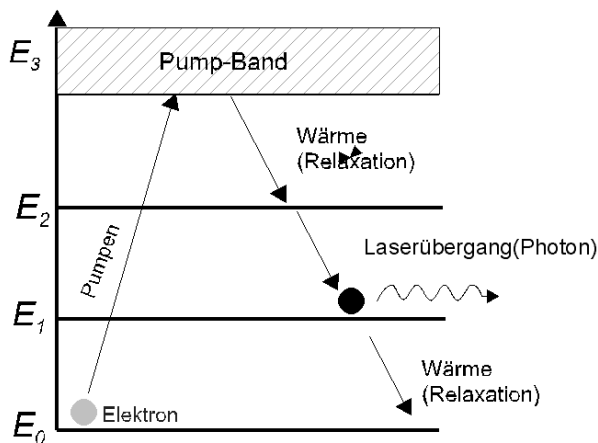
Bei Laser in anderen Teilen des elektromagnetischem Spektrums kommt man mit 2 Niveaus nicht mehr aus. Eine noch so hohe Lichtintensität reicht nicht aus um eine geeignete Inversion zu erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit auf eine spontane Emission ist zu hoch als das eine Besetzungszahl Inversion eintreten könnte. Diese Tatsache ist unabhängig von der Anregungsart der Atome. Abhilfe schaffen 3 oder 4 Niveau Laser.

Um eine Inversion zu erzeugen braucht man 3 Niveaus. Im angeregtem Zustand befinden sich die Elektronen in einem der oberem Niveaus, im nicht angeregtem Zustand nur im unterem. Durch anregen des Materials, werden die Elektronen nun ins

oberste Niveau gehoben, hier Niveau 3. Von dort gehen die Elektronen schnell ins Niveau 2 über ohne Strahlung auszusenden. Niveau 2 ist quasi ein Zwischenbereich zum sammeln. Dort haben die Elektronen eine relativ große Verweil Dauer, und warten auf ihre Stimulierung zur Emission. So hat man die Pumpfrequenz von der Laserfrequenz entkoppelt.



Diese 3 Niveau Laser kommen z.B. in Rubin Laser zu tragen. Aber auch am 3 Niveau Laser gibt es noch einen Mangel, nämlich die hohe Pumpleistung die gebraucht wird um die Elektronen aus dem Grund Niveau auf das 3te anzuheben. Hier verschafft man sich Abhilfe in dem man ein 4 Niveau System benutzt. Die Elektronen werden in das 4te Niveau gehoben, von da fallen sie ins 3te zurück, und geben zwischen 3tem und 2tem Niveau ihre Emission ab, im 1ten Niveau warten sie dann auf ihre erneute Anregung ins 4te Niveau zurück. Dadurch das die Elektronen nicht jedes Mal aus ihrem Grundstadium gehoben werden müssen wird eine viel geringere Pumpleistung benötigt. Aufgrund dieser Energie Ersparnis liegt allen heutigen Lasern ein 4 Niveau System zu Grunde.



### **-Energiezufuhr**

Um eine Inversion zu erzeugen brauchen wir Anregungs-Energie. Auf welche Weise man die Energie dem Laser zuführt, hängt stark vom Material ab. Grob kann man aber 3 große Anregungsgruppen unterscheiden:

#### *Mit Lichtquellen:*

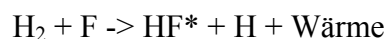
Das sog. Optische Pumpen, geschieht mit Hilfe von Blitzlampen,  
einer Art Leuchtstoffröhre,  
oder auch einem zweiten Laser.

#### *Mit einer Gasentladung:*

Hier wird eine Inversion durch Elektronenstöße in einer Gasentladungsröhre erzeugt. Es gibt hier 2 Arten der Stöße, bei der ersten Art wird das aktive Lasergas direkt angestoßen. Bei der zweiten Art geschieht dies über den Umweg über ein Hilfsgas das dann weiter das aktive Gas anstößt.

#### *Mit chemischer Anregung:*

Als Beispiel sei hier der Fluorwasserstoff-Moleküllaser genannt:



Wasserstoffgas und atomares Fluorgas verbinden sich zu angeregtem Fluorwasserstoff HF\*, der wie auch anders angeregte Stoffe beim zurückfallen in das untere Niveau die gewünschte Laserstrahlung abgibt. Außerdem entsteht atomarer Wasserstoff und Wärme.

Aufgrund der hohen gebunden chemischen Energie kann man durch chemische Anregung sehr Leistungsstarke Laser konstruieren.

*Mit elektrischer Anregung:*

Hauptsächlich Halbleiter Laser werden auf elektrischem Wege angeregt, hier sorgt die direkte Einwirkung des elektrischen Stromes auf den Halbleiter für die gewünschte Inversion.

### **-Der Resonator**

Hat man nun seine Inversion erreicht und auch die Anregung klappt, so strahlt das Lasermaterial Strahlung nach allen Richtungen aus, und verstärkt sich durch die Emission der Nachbaratome selbst. Doch wie kann man diese Strahlung noch weiter erhöhen?

Am einfachsten ist es man verlängert die Strecke die auf der sich die Strahlung durch das Lasermaterial bewegt. Benutzt man z.B. Material in Form eines langen Zylinders, so tritt die stärkste Strahlung an den flachen Seitenflächen auf, weil die Strahlung bis da die längste Strecke zurückgelegt hat. Durch anbringen eines Spiegels an einer Seite hat man schon eine beträchtliche Strahlung, die an der anderen Seite des Materials herauskommt. Weiter kann man optimieren indem man einen weiteren Spiegel an der noch nicht verspiegelten Seite anbringt. Um aber auch Strahlung aus dem Laser heraus zubekommen, und nicht im Material gefangen zu halten, benutzt man einen halbdurchlässigen Spiegel an einer Seite. Hier wird der Laserstrahl *ausgekoppelt*. Diese Konstruktion aus einem Spiegel und der sog. Auskoppel-Optik, nennt man *Resonator*. Der Vorteil einer Resonator Optik ist, dass man durch sie die Laserfrequenz feiner Einstellen kann als mit der Auswahl eines Lasermaterials. Der Resonator unterdrückt immer bestimmte Frequenzen die nicht zur Resonator Länge passen. Nur Frequenzen die Vielfache der Resonator Länge sind werden verstärkt. So kann man die Frequenz grob durch das Material und genauer durch den Resonator auswählen.

Es gibt allgemein viele Typen von Resonatoren, welche die mit Planen Spiegeln arbeiten aber auch konfokale Spiegel, die einfacher zu justieren sind, aber auch ganze Ringsysteme sind gebräuchlich. Auch bei den Auskoppeloptiken gibt es verschiedene Einstellmöglichkeiten und Bauweisen. So kann man durch verändern der Transparenz verschieden Starke Strahlen erhalten, oder auch gepulste Laser, indem man durch z.B. mechanische Drehspiegel, elektrooptische Schalter oder auch chemische Absorber die

Durchlässigkeit variabel hält. Man stellt den Spiegel auf 100% Reflexion und wartet bis das Lasermaterial durch eigen Verstärkung der Strahlung auf ein Maximum angestiegen ist, erst dann gibt man die Optik zur Auskoppelung frei. Pulse mit hoher Intensität sind das Ergebnis eines solchen Vorgehens.

### **-Zukunft der Laser Entwicklung**

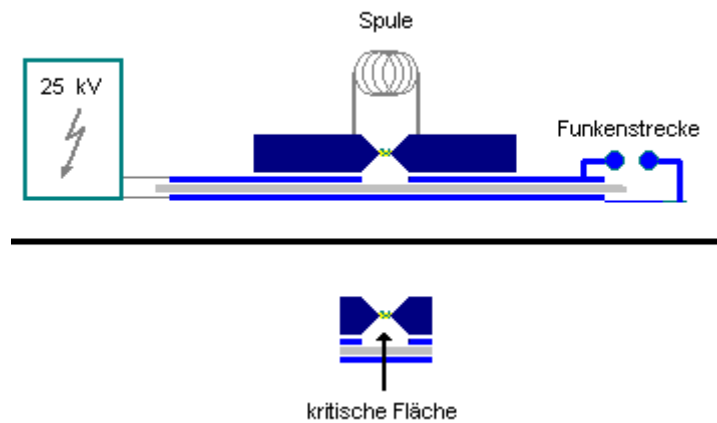
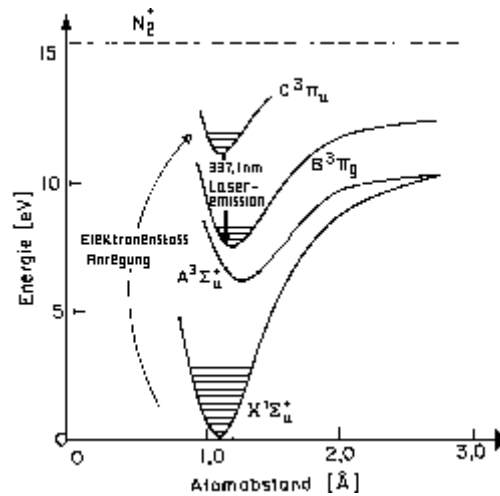
Eins der größten Probleme vor der die Entwicklung aktuell steht ist der Zusammenhang zwischen Laserfrequenz und spontaner Emission. Will man in den für die Forschung interessanten Bereich der Röntgen-Laser vordringen, so steht man schnell vor dem Problem, das trotz aller bisher gut funktionierenden Techniken zur Erzeugung einer Inversion, der Bereich der Röntgenstrahlung und damit das Vordringen in die hohen Frequenzen nicht leicht zu realisieren ist. Die spontaner Emission tritt schneller ein als es für eine funktionierende Inversion darf. Als Lasertypen mit Zukunft gibt es einmal den Plasma-Röntgenlaser, hier ist das Laser Material in Plasmatischem Zustand. Erreicht wurde so ein Plasma Laser mit Hilfe einer Kernexplosion. Eine Kernexplosion ist natürlich eine Denkbare ungeeignete Plattform für einen zivilen Laser, auch ist er nur einmal benutzbar, was die Funktion einschränkt. Interessanter ist das schon der Freielektronen Laser, er basiert darauf das Elektronen bei sehr hohen Geschwindigkeiten Strahlung aussenden. Eine Magnetkonstruktion zwingt die Elektronen auf Wellenbahnen zu schwingen und dabei Strahlung auszusenden. Nachteil bei diesem Laser, hohe Kosten und die Größe des Lasers an sich.

### 3. Ein N<sub>2</sub>-Superstrahler

#### -Theorie

Als ich anfangs Gedanken zur Facharbeit gemacht habe, und es feststand das ich Physik schreiben konnte wie gewollt, dachte ich erst daran eine Elektrotechnik arbeit zu machen. Doch das Thema Laser wollte mir nicht aus dem Kopf gehen. Ich erinnerte mich daran mal etwas zu einem Versuch gelesen zu haben den eine Universität mit ihren Studenten im Erstsemester für Physik machte. Es handelte sich dabei um ein „simplen“ Versuchsaufbau, um den Studenten das Funktionsprinzip eines Lasers zu verdeutlichen. Gebaut hatte man aus einfachen Materialien eine Funkenstrecke an der Luft, auf der die Atome von Stickstoff angeregt werden sollten. Im Vergleich zu einem Laser fehlt an der Konstruktion der Resonator, um die entstandene Strahlung zu verstärken. Um die Funken Strecke zu erzeugen hatte man einen Kondensator aus Aluminium Folie und Kopier Folie genommen dessen einen Platte (Folie) aber zweigeteilt war und zwischen dieser Trennung soll später die Funkenladung stattfinden. Auf der geteilten Folie hatte man 2 Aluminium Platten gelegt die an einem Ende eine Schneide hat. Um ein Aufladen des Kondensators zu ermöglichen hat man die beiden oberen getrennten Folien zusätzlich mit einem aus Draht gedrehten Widerstand verbunden. Der Widerstand muss klein genug sein um ein Aufladen zu ermöglichen, aber muss auch groß genug sein um bei einer plötzlichen Entladung einer Seite trotzdem noch eine hohe Spannung aufrecht zu erhalten. Um diesen plötzlichen Spannungs-Abfall zu erreichen legt man eine sekundäre Funkenstrecke zwischen einer oberen Kondensator Hälfte und der unteren Kondensator Folie an. Sobald diese auslöst und ein Funken überspringt, ist die Spannung zwischen den beiden Schneiden der Aluminium Platten zu hoch, als das der Draht Widerstand sie schnell genug ausgleichen könnte, die Ladung fließt zwischen den beiden Aluminium Schneiden durch die Luft und regt die dort vorhandenen Gase an. Stickstoff ist hier das Gas das uns interessiert. Die Elektronen des Stickstoffs laufen bei diesem Versuch 3 Niveaus durch, durch die Entladung werden die Elektronen ins höchste Niveau gehoben, die Energie die das Elektron jetzt hat liegt bei ca. 11eV, das oberste Niveau ist aber beim Stickstoff nicht sehr stabil, durch spontane Emission fällt es ins 2te Niveau zurück und gibt dabei ein Photon ab, die Energie ist jetzt noch bei ca. 7,3eV. Das freigesetzte

Photon fliegt weiter und löst die Emission bei benachbarten Atomen aus, ein Laserstrahl entsteht. Nach dem freisetzen eines Photons bleibt das Elektron aber erst mal in dem stabilem 2ten Niveau. Da das 2te Niveau wesentlich stabiler ist als das erste, (10 $\mu$ s gegen 40ns) und das untere Niveau die Laserstrahlung nicht wieder aufnimmt, ist der N<sub>2</sub> Laser „self-terminating“, weil der Laserprozess sich selbst wieder unterbindet. Deshalb sind mit einem Stickstoff Laser nur kurze Impulse unter 15ns Länge möglich. Die Wellenlänge des Emittierten Photons liegt wie bei allen Stickstoff Lasern bei 337,1nm.



Die kritische Fläche ist der Bereich wo die Entladung stattfinden soll, bevorzugt auf einer planen Ebene zwischen den beiden Schneiden.

## **-Praxis**

Als ich mich daran machte diesen Versuch selbst durchzuführen und mit dem Superstrahler zu experimentieren, stieß ich sehr bald auf die ersten Probleme, die mich aber nicht abhielten dennoch einen positiven Schluss aus meiner Arbeit zu tun.

Zuerst musste ich die Materialien auftreiben, so sicherte mir mein Bruder schnell zu mir ein Netzteil zur Verfügung zu stellen, weil ein Selbstbau zwar möglich aber nicht ungefährlich und auch mit Kosten verbunden wäre die ich nicht auf mich nehmen wollte. Das Netzteil das ich dann kurz zur Verfügung hatte, war ein Hochspannungs-Netzteil eines tragbaren 15mW HeNe-Lasers. Die Ausgangsspannung lag bei ca. 10kV, was zur Durchführung reichte, und manchmal auch schon fast zuviel war.

Auch die anderen Materialien wie Aluminium Folien die jeder im Haus hat, und ein Widerstand aus Draht war schnell hergestellt. Die sekundäre Funken Brücke aus schrauben war auch schnell gebaut. Doch 2 Aluminium Platten mit 2 geraden Schneiden stellte mich vor einige Probleme.

Die Schlossereien und Werkstätten (im Kreis Soest) bei denen ich nachfragte konnten alle keine so präzisen Arbeiten fertigen ( 6cm breit, 20cm lang, 0.5cm hoch, und die Schneide an einer Seite in der Mitte ) . Die Schneiden stellten das größte Problem dar, bis jetzt habe ich noch keine Aluminium Platten mit 2 geeigneten Schneiden. Um aber trotzdem zu experimentieren, besorgte ich mir bei Zompras (Metallbau), aus der Werkstatt 2 Metallplatten die die gewünschten Maße hatten, aber keine Schneiden sondern nur leicht gerundete Seitenteile besaßen.

Die kurze Zeit in der ich das Netzteil zur Verfügung hatte, nutze ich damit um ein paar Versuche zu machen. Das Ergebnis war besser als ich erwartet hatte, da ich auch mit den beiden Metall Platten ab und zu eine Emission beobachten konnte.

Das Hauptproblem war die schlechte Fertigung meiner Metallplatten, trotz abschleifen mit der Hand, war die Seite doch sehr uneben, und durch die leichte Krümmung gab es nicht wie gewünscht eine Schneide an der die Entladung stattfinden konnte. So gab es sehr selten eine Entladung auf die auch eine Emission folgte, den dafür benötigt man eine plane Ebene auf der die Funken Entladung stattfinden sollte.

Auch zu schaffen machte einem der Aluminium Kondensator, oft ist die Kopierfolie einfach durchschlagen worden, und auch die Aluminium Folien selber hielten nicht sehr viel aus.

### **-Schlusswort**

Wenn ich im Nachhinein über meine Entscheidung für dieses Facharbeitsthema nachdenke, so würde ich keinem anderem Empfehlen ein solches zu nehmen. Nicht das es nicht zu schaffen sei, doch es ist schon ziemlich hart wenn man vor einem Problem steht für das es keine Lösung gibt. So stand und stehe ich jetzt noch vor dem Problem keine 2 vernünftigen Aluminium Platten zu besitzen, die für die Funktion des Versuchs entscheidend sind. Allein aus persönlicher Interesse, habe ich noch bei weiteren Firmen nachgefragt die nicht aus dem Kreis Soest kommen um, um an solche Platten zu kommen.

Allgemein kann man aber sagen das die Idee des Nachbaus dieses Experimentes unheimlich interessant und lehrreich ist, da man nicht nur mit einem Thema der Physik beschäftigt ist, sondern auch über Kenntnisse in der Elektrotechnik mitbringen muss um den Versuch zu verstehen.

Um diesen Versuch im Unterricht oder außerhalb davon nach zu bauen sollte man, bevor man sich um andere Materialien kümmert, die Aluminium Platten besondere Aufmerksamkeit schenken, denn wie ich aus anderen Erfahrungs-Berichten gelesen habe, liegt hier das Hauptproblem des Scheiterns. Hat man aber solche gefunden/erstanden, so kann man mit diesem Versuch sehr anschaulich das Prinzip bei angeregter Emission nachvollziehen.

Im Anhang habe ich noch 2 Bilder des selben Versuchs wie es das Gymnasium Korschebroich durchgeführt hat, das Gymnasium hat das Experiment im Rahmen ihres Physik Unterrichts durchgeführt.

## **Quellennachweis:**

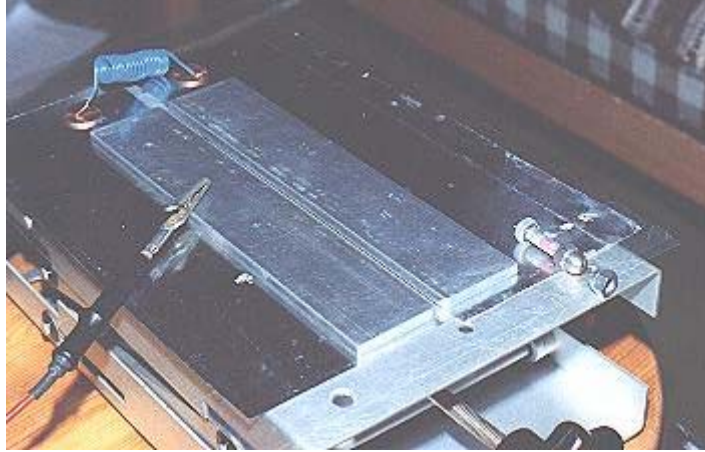
<http://www.fsphy.uni-duesseldorf.de>, online gestellt k.A., stand 20.2.2001

„Laser- das andere Licht“, 1989 Georg Thieme Verlag, Angelika Anders-von Ahlften,  
Hans Jürgen Altheide

<http://pl.physik.tu-berlin.de>, online gestellt 3.1.2000, stand 20.2.2001

<http://users.aol.com/gykophys/>, online seit k.A., stand 20.2.2001

## Anhang



Hier einmal der Versuch auf einem geerdetem Gestell. Darunter anstatt der Aluminium Schneiden handelsübliche 6-Kant Dreher.