

V60

## **Diodenlaser**

Lars Frederik Poppe	Hannah Rolf
<a href="mailto:lars.poppe@tu-dortmund.de">lars.poppe@tu-dortmund.de</a>	<a href="mailto:hannah.rolf@tu-dortmund.de">hannah.rolf@tu-dortmund.de</a>

Durchführung: 18. Dezember 2017      Abgabe: 15. Januar 2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

# 1 Zielsetzung

Das Ziel des Versuches ist die Aufnahme des Absorptionsspektrums von Rubidium mit Hilfe eines Diodenlasers. Diese Art von Laser wird genutzt, da hier eine schmale spektrale Breite erzeugt werden kann, welche die Auflösung von Hyperfeinstruktur-Übergängen ermöglicht. Zudem sind Diodenlaser im Vergleich zu anderen Lasern leichter bedienbar und weniger kostenaufwendig. Zur Aufnahme des Spektrums wird der Laser zunächst justiert. Dieser Schritt ist fehleranfällig, da die Justierung äußerst vorsichtig vorgenommen werden sollte. Bereits kleine Änderungen an Komponenten des Aufbaus, wie zum Beispiel eine Verschiebung des Beugungsgitters, auf welches später näher eingegangen wird, können großen Einfluss auf die Arbeitsweise des Lasers haben. Des Weiteren sollten alle Komponenten bezüglich des Strahlengangs richtig ausgerichtet sein, da das Laserlicht ansonsten nicht oder nur teilweise durch sie hindurchgeht. Nach der Justierung wird das Absorptionsspektrum aufgenommen. Dazu werden Photodioden verwendet, welche die Intensität des Lichtes nach Durchgang durch eine Rubidiumzelle messen, und deren Signale anhand eines Oszilloskops ausgewertet.

## 2 Theorie

### 2.1 Grundlegendes über Laser

Laserlicht ist monofrequentes Licht, welches sich durch eine extrem hohe Kohärenz auszeichnet. Das bedeutet, dass die Phasenbeziehung zwischen ausgesandten Lichtwellen sich mit der Zeit kaum ändert. Die ausgesandten Photonen eines Lasers haben also vergleichsweise lange eine verschwindende Phasendifferenz. Im Allgemeinen bestehen Laser aus drei Komponenten: dem Medium, der Pumpe, sowie dem Resonator. Durch die Pumpe, welche als Energiequelle dient, wird im Medium ein sogenannter Inversionzustand erzeugt. Dadurch ist das Aussenden des kohärenten Laser-Lichtes durch Übergänge von Elektronen im Medium möglich. Der Resonator wird gebraucht um die Intensität des entstandenen Lichtes zu erhöhen. Wie die Komponenten explizit funktionieren wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### 2.1.1 Das Medium

Als Medium muss ein Material verwendet werden, in dem die Erzeugung eines Inversionszustandes möglich ist. Das bedeutet, dass ein energetisch höher liegendes Niveau stärker von Elektronen besetzt ist, als ein niederenergetisches. Handelt es sich um ein System ohne Entartung der Energiezustände, so sind die Wahrscheinlichkeiten, dass ein Photon im Medium absorbiert wird und dass es durch stimulierte Emission zur Emission eines weiteren Photons kommt nach Einstein gleich. Daher ist die Erzeugung eines Inversionszustands bei einem Zwei-Niveau-System ohne Entartung nicht möglich. Im zeitlichen Mittel würden gleich viele Elektronen durch Photon-Absorption in das höhere Niveau gebracht werden können, wie durch stimulierte Emission in das niedrigere Niveau übergangen, sodass der Inversionszustand nicht erreicht wird. Wird dagegen ein

3-Niveau-System betrachtet, welches aus einem stabilen Zustand  $E_1$ , einem semi-stabilen Zustand  $E_2$  und einem instabilen Zustand  $E_3$  besteht, so lässt sich durch Einstrahlen von Photonen ein Inversionszustand erzeugen. Ein solches Medium ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

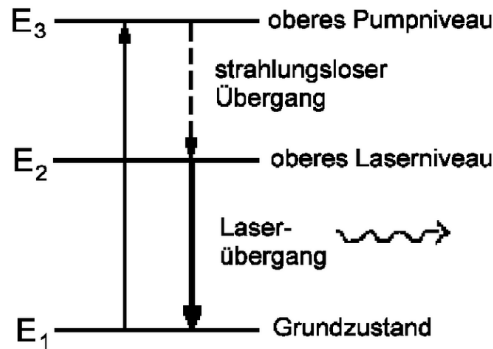


Abbildung 1: Energieschema eines 3-Niveau-Lasers [1].

Beträgt die Energie der Photonen gerade die Differenz zwischen  $E_1$  und  $E_3$ , so können durch Absorption Elektronen in das höchstliegende Niveau "gepumpt" werden. Da der Zustand  $E_3$  allerdings instabil ist, werden diese im Laufe der Zeit in das Niveau  $E_2$  übergehen. Bei diesem Übergang wird die Energie nicht in Form von Strahlung ausgesandt, sondern über andere Energieformen, wie zum Beispiel thermischer Energie, abgegeben. Von dort können sie nicht wieder in das obere Energieniveau übergehen, da die Energiedifferenz nicht der Energie der eingestrahnten Photonen entspricht. Mit der Zeit werden also immer mehr Elektronen aus dem ersten in das dritte Niveau angehoben und gehen von dort in das zweite über. Wird dieser Vorgang für eine endliche Zeit wiederholt, so befinden sich eher Elektronen im zweiten, als im ersten Niveau, da dieses nach und nach "leer gepumpt" wird. Es lässt sich also sagen, dass ein energetisch höher liegender Zustand stärker besetzt ist. Somit liegt ein Inversionszustand vor. Das Laserlicht entsteht nur durch den Übergang der Elektronen aus dem zweiten in das erste Energieniveau. Die dabei ausgesandten Photonen haben die gleiche Energie  $h\nu = E_2 - E_1$ .

### 2.1.2 Die Pumpe

Wie bereits erwähnt, wird die Pumpe benötigt, um einen Inversionszustand herzustellen, also den Übergang von Elektronen zwischen Energieniveaus zu ermöglichen. Mögliche Pumpen sind zum Beispiel das Licht eines anderen Lasers, allerdings auch nicht-optische Anregungen wie beispielsweise durch Hitze oder Strom. Auf die Funktionsweise von Strom als Pumpe wird bei der Beschreibung des Diodenlasers näher eingegangen.

### 2.1.3 Der Resonator

Mit Hilfe des Resonators wird die Intensität des erzeugten Lichtes verstärkt. Als Resonator werden meistens zwei Spiegel an den Enden des Mediums verwendet, von denen einer vollständig reflektiert und der andere halb-durchlässig ist. Da durch ihn das Licht an einer Seite aus dem Medium austreten kann wird er auch als Auskopplungsspiegel bezeichnet. Durch die Anordnung der Spiegel werden mehrere Effekte erzielt. Nach dem Aussenden der Photonen können diese sich zunächst in alle Richtungen bewegen. Durch die Spiegel wird allerdings nur eine Richtung der Photonen (senkrecht zur Spiegeloberfläche) vollständig verstärkt, sodass die Photonen sich mit der Zeit auf parallelen Bahnen bewegen. Die Erhöhung der Intensität entsteht durch zwei Effekte. Erstens können die Photonen bei jedem Durchgang durch das Medium erneut Photonen durch stimulierte Emission erzeugen, zum anderen kommt es zwischen den Spiegeln zur Ausbildung einer stehenden Welle. Dadurch, dass stimulierte Emission genutzt wird um Photonen zu erzeugen ist sichergestellt, dass diese mit den anderen in Phase sind (also Kohärenz vorliegt). Außerdem kommt es für bestimmte Frequenzen durch die stehende Welle zu konstruktiver Interferenz, welche die Intensität weiterhin erhöht. Unter Verwendung, dass für die Länge des Resonators (hier der Abstand der Spiegel)  $l$ , die Wellenlänge  $\lambda$  und den Brechungsindex  $n$  für konstruktive Interferenz

$$l = \frac{1}{2} \lambda n$$

gelten muss, sowie dem Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Frequenz  $f$  und Lichtgeschwindigkeit  $c$  ergibt sich für den Abstand zweier verstärkter Frequenzen der Zusammenhang

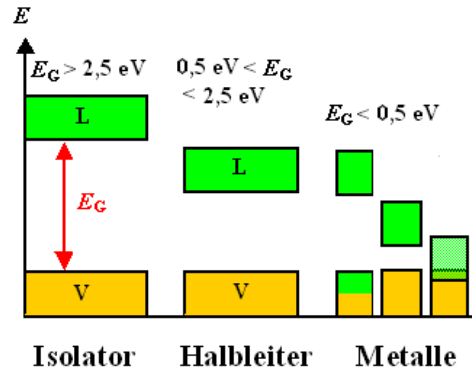
$$\Delta f = \frac{c}{2ln}.$$

## 2.2 Der Diodenlaser

Der Diodenlaser ist eine Form von Halbleiterlaser. Er wird unter Anderem zur optischen Nachrichtenübertragung, aber auch als Pumplaser zum Betrieb anderer Laser verwendet. Das Medium eines Diodenlasers besteht wie bereits angedeutet aus einem Halbleiter. Bevor die Funktionsweise eines Diodenlasers genauer beschrieben wird, werden zunächst einige Begriffe der Halbleiterphysik erläutert, welche zum Verständnis des Diodenlasers beitragen.

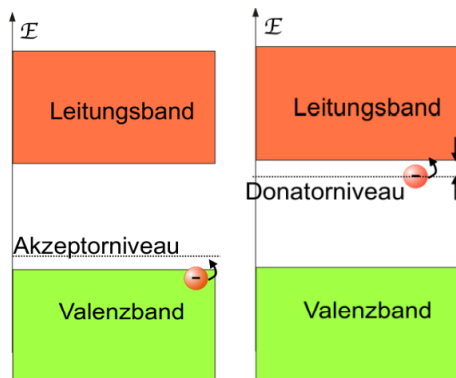
## 2.3 Grundlagen zu Halbleitern

Halbleiter sind, wie Isolatoren, bei einer Temperatur von 0K nicht leitend, da zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband eine Bandlücke besteht. Diese ist im Vergleich zu Isolatoren allerdings deutlich kleiner (wenige eV). Bei steigender Temperatur können daher einige Elektronen aufgrund der zusätzlichen thermischen Energie die Bandlücke überwinden, weswegen die Leitfähigkeit eines Halbleiters mit steigender Temperatur zunimmt. Die Bandstruktur eines Halbleiters ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Bandstrukturen eines Isolators, eines Halbleiters und eines Metalles im Vergleich [4].

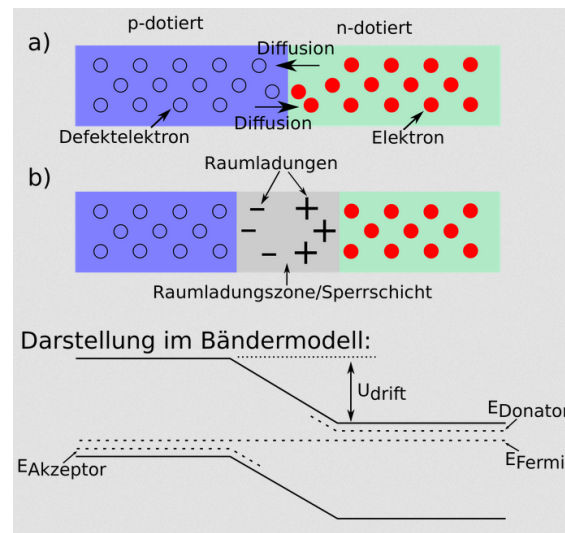
Zusätzlich zu den Bändern ist die sogenannte Fermienergie von Interesse, also die Energie, die Elektronen bei verschwindender Temperatur maximal haben können. Diese ist, da nach dem Pauli-Prinzip zwei Elektronen nie in allen Quantenzahlen gleich sein können, größer als null. Bei Isolatoren und Halbleitern liegt sie in der Bandlücke zwischen den Bändern, während sie beim Metall innerhalb eines Bandes liegt. Bei den verwendeten Halbleitern im Diodenlaser handelt es sich um dotierte Halbleiter. Durch Dotierung, also das Einbringen von Fremdatomen, wird die Leitfähigkeit des Halbleiters erhöht. Es wird zwischen zwei Arten von Dotierung unterschieden. Bei der p-Dotierung werden Fremdatome eingebracht, welche ein Elektron weniger besitzen, als die Atome des Materials. Dadurch herrscht ein Elektronenmangel, was im Energieschema zur Entstehung eines zusätzlichen Akzeptorniveaus führt. Bei der n-Dotierung hingegen werden Atome eingefügt, welche über ein Elektron mehr verfügen. Diese fungieren durch den entstehenden Elektronenüberschuss als sogenannte Donatoren. Das zusätzliche Energieniveau wird daher auch als Donatorniveau bezeichnet. Die Bandstruktur dotierter Halbleiter lässt sich Abbildung 3 entnehmen.



**Abbildung 3:** Bandstruktur eines p-(links), bzw. n-dotierten (rechts) Halbleiters [9] bearbeitet .

### 2.3.1 pn-Übergang

Bei einem pn-Übergang kommt es zu einer Zusammenführung von p- und n-dotierter Schicht. In der n-Schicht können sich einige Elektronen durch Diffusion bewegen, wohingegen die positiven Atomkerne gebunden sind. In der p-Schicht hingegen sind alle Elektronen gebunden und die durch das Dotieren entstandenen Löcher bewegen sich diffusionsartig. In der Mitte zwischen den Schichten kann es deswegen dazu kommen, dass Löcher und Elektronen unter Aussendung von Photonen rekombinieren, sodass es zur Ausbildung einer sogenannten Verarmungszone ohne frei bewegliche Ladungsträger kommt. Da die Elektronen aus der n-Schicht und die Löcher der p-Schicht nun nicht mehr für Ladungsneutralität auf beiden Seiten sorgen, entsteht zudem eine Potentialdifferenz. Die p-Schicht ist dabei negativ und die n-Schicht positiv geladen. Der pn-Übergang ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.



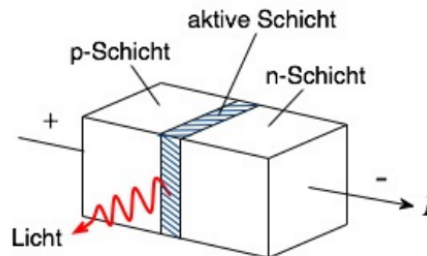
**Abbildung 4:** Schematische Darstellung eines pn-Übergangs [2] *bearbeitet* .

Neben der Entstehung der Potentialdifferenz kommt es zudem zu einem Angleichen der Fermienergie in den beiden Schichten und infolgedessen zu einer Bandverbiegung. Wird nun eine positive Spannung an die p- und eine negative Spannung an die n-dotierte Schicht angelegt (Durchlassrichtung), so können einige Löcher und Elektronen die innere Potentialdifferenz überwinden und jeweils in Richtung des Überganges wandern, sodass Licht durch Rekombination entstehen kann. Dies lässt sich auch im Bändermodell erklären. Ist die Bandverbiegung groß genug, so liegt im schematischen Bändermodell ein Teil des Valenzbandes über und ein Teil des Leitungsbandes unter der Fermienergie, so dass es zu teil-gefüllten Bändern und somit einer Leitfähigkeit des Systems kommt. Wird eine

Spannung mit entgegengesetzter Polung angelegt fließt kein Strom (Sperrichtung).

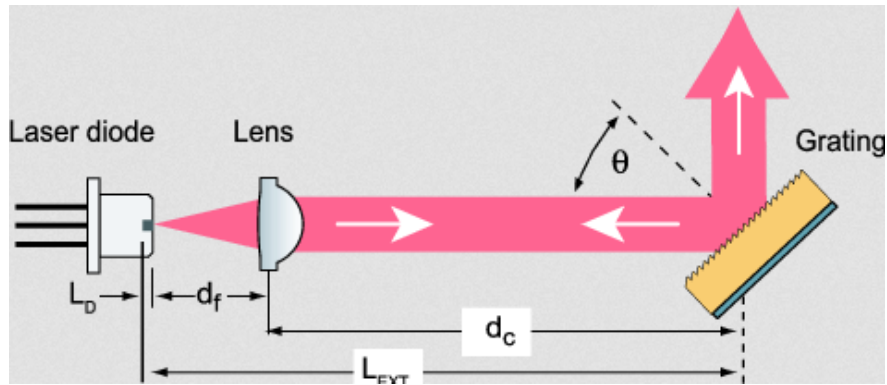
## 2.4 Aufbau eines Diodenlaser

Ein Diodenlaser gehört zur Gruppe der Halbleiterlaser. Er besteht aus einer n- und einer p-dotierten Schicht, welche in Kontakt stehen, sodass, wie zuvor beschrieben, ein pn-Übergang entsteht. Nach Anlegen einer Spannungsquelle in Durchlassrichtung entsteht in der Mitte zwischen den Schichten durch Rekombination von Löchern und Elektronen das Laserlicht. Dieses bewegt sich innerhalb des Kristalles nur in einem schmalen Kanal zwischen p- und n-Schicht fort, das es aufgrund der hohen Brechungsindizes der Halbleiterschichten an diesen total reflektiert wird. Bei Diodenlasern werden als Resonator keine zusätzlichen Spiegel verwendet. Die Enden des Halbleiterkristalles werden so geschliffen, dass die Photonen am einen Ende vollständig und am anderen teilweise ins Medium zurück reflektiert werden. Da bei Diodenlasern eine hohe Elektronendichte im Medium besteht, lässt sich eine hohe Verstärkung der Intensität erreichen. Der Aufbau eines Diodenlasers ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt.



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Aufbaus eines Diodenlasers [8].

Würde zur Aufnahme des Rubidiumspektrums ein reiner Diodenlaser benutzt werden, so entstünden hauptsächlich zwei Probleme. Zum einen ist die Emissionslinie spektral so breit, dass spektral schmale Übergänge nicht aufgelöst werden können, was aber Ziel des Versuchs sein soll. Zum Anderen sind die Laser sensitiv auf optisches Feedback, also Einfallen von reflektiertem Licht. Beide Probleme können mit Hilfe eines Beugungsgitters umgangen werden. Der Laser und das Gitter werden hier nach der Littrow-Konfiguration angeordnet, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist.



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung der Anordnung von Diodenlaser und Beugungsgitter (Littrow-Konfiguration) [7].

Durch diesen Aufbau wird ungefähr 15% des Lichtes in den Laser zurück reflektiert. Dabei handelt es sich um Licht, welches in erster Ordnung am Gitter gebeugt wird. Durch dieses kontrollierte optische Feedback wird der Laser deutlich insensitiver gegen zusätzliche Rückeinstrahlung von Licht. Zudem lässt sich die Wellenlänge durch das Gitter so reduzieren, dass der Abstand zwischen Frequenzen die erzeugt werden können geringer sind als  $\Delta\nu = 1\text{MHz} = 4,14 \cdot 10^{-9}\text{eV}$ , sodass atomare Übergänge in Rubidium, welche bei einer Frequenzdifferenz von ungefähr 1,6eV liegen gut aufgelöst werden können.

## 2.5 Laserlicht und optische Verstärkung

Die Frequenz des Laserlichtes hängt von vier verschiedenen Faktoren ab, da der Laser in der Mode arbeitet, welche die größte optische Verstärkung bietet. Die Anteile der verschiedenen Faktoren an der gesamten optischen Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz sind in Abbildung 7 dargestellt.



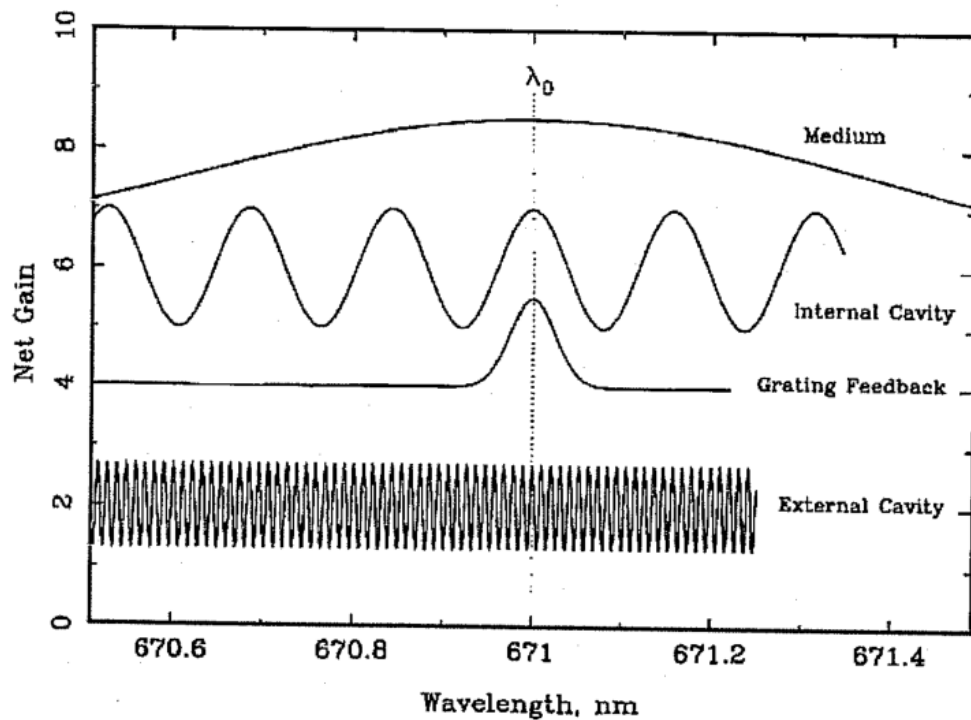


Abbildung 7: Schema der verschiedenen Anteile zur Gesamtverstärkung des Lasers [3].

Die Medium-Verstärkung (Medium gain) ist eine Eigenschaft des verwendeten Materials. Wird die Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz betrachtet, so lässt sich feststellen, dass ein flacher, breiter Peak entsteht, welcher sich mit steigender Temperatur nach links verschiebt. Daher wird die Temperatur des Lasers so eingestellt, dass sich das Maximum der Kurve bei der gewünschten Frequenz (da hier das Absorptionsspektrum von Rubidium untersucht werden soll  $\lambda = 780 \text{ nm}$ ) befindet. Anschließend lässt sich der Anteil durch das Medium vernachlässigen, da der Verlauf der Kurve verglichen mit den anderen drei Anteilen sehr flach ist.

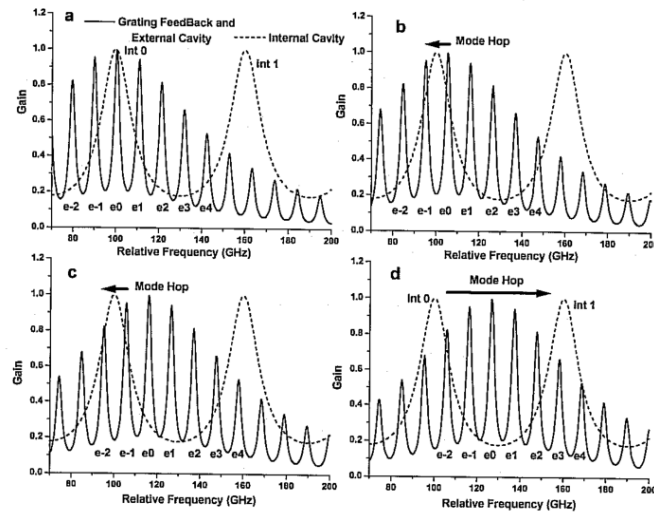
Die interne Kavität (internal cavity) entsteht durch die optische Kavität des Kanals in dem das Licht innerhalb des Halbleiters hin- und her-reflektiert wird. Der Verlauf der Verstärkung in Abhängigkeit der Frequenz wird durch die entstehenden Maxima aufgrund der stehenden Welle bestimmt, welche dem Zusammenhang in Gleichung 2.1.3 genügen. Zudem wird der Verlauf durch den durch das Halbeliermaterial fließenden Strom beeinflusst. Dieser erhöht zum einen die Temperatur im Halbleiter. Zum Anderen ändert er die Konzentration an Ladungsträgern in der aktiven Region, wodurch sich die optische Weglänge verändert.

Der Frequenzverlauf der durch das Beugungsgitter zurück-reflektierten Strahlung (Gra-

ting Feedback) ist im Gegensatz zur internen Kavität nicht periodisch. Er wird lediglich dadurch bestimmt, dass die reflektierte Strahlung eine endliche Breite an Frequenzen annehmen kann. Die Breite hängt von der Anzahl der Gitterlinien und der Breite des Laserstrahls ab. Das Maximum der Kurve kann durch Drehen des Gitters verändert werden.

Die externe Kavität (external cavity) wird durch den Abstand zwischen Beugungsgitter und hinterem geschliffenen Ende des Halbleiters bestimmt. Ebenso wie bei der internen Kavität entstehen hier stehende Wellen und in der Verstärkung somit mehrere Moden, die sich ebenfalls über Gleichung 2.1.3 berechnen lassen, wobei  $l$  hier der zuvor beschriebene Abstand ist. Wird die Position des Gitters verändert, so verschiebt sich die Kurve zu anderen Frequenzen.

Da die Moden der internen und externen Kavität nicht dieselben sind, kommt es beim Durchlaufen verschiedener Frequenzen des Laserlichts zu sogenannten "mode-hops". Dabei hüpft der Laser innerhalb einer internen Moden zunächst zwischen den Moden der externen Kavität, bis die Gesamtverstärkung einer externen Mode bei anderer interner Mode größer ist. Dieses unregelmäßige Hüpfen ist in Abbildung 8 dargestellt.



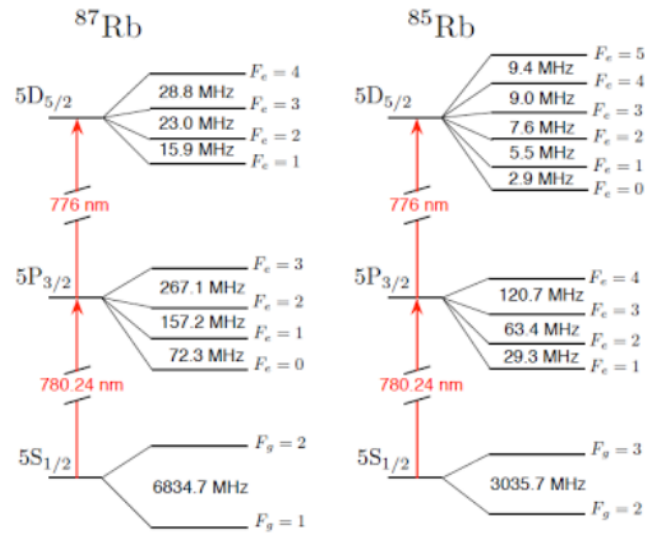
**Abbildung 8:** Darstellung des "Modenhüpfen" zwischen externen und internen Moden des Lasers beim Durchfahren verschiedener Frequenzen [3].

Der gesamte Frequenzbereich lässt sich außer durch Verstellen des Gitters durch Veränderung des Stromes abdecken. Dadurch steigt die Temperatur im Halbleiter und somit verändert sich die Bandlücke, die von den Elektronen überwunden werden muss. Infolgedessen verändert sich die Energie der ausgesandten Photonen, bzw. in anderen Worten ihre Frequenz. Um das Frequenzspektrum kontinuierlich durchfahren zu können, müssen die Gainkurven also gleichzeitig verschoben werden. Die Drehung des Gitters und die Änderung des Stromes werden so aufeinander abgestimmt, dass es nicht mehr zu "mode-hops" kommt, sondern sich die Frequenz bei der die größte Verstärkung erreicht

wird kontinuierlich verschoben, der Laser also ohne Lücken im Frequenzspektrum arbeitet.

## 2.6 Absorptionsspektrum von Rubidium

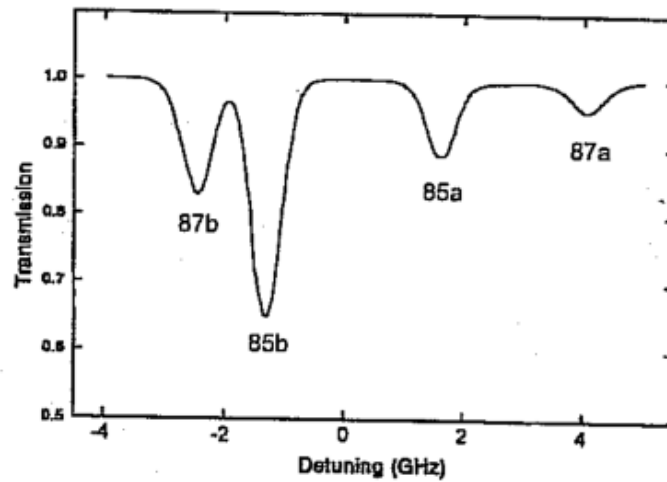
Mit Hilfe des Diodenlasers lassen sich Aussagen über die Hyperfeinstrukturaufspaltung des Rubidium-Termschemas treffen, indem das Absorptionsspektrum in einem bestimmten Frequenzbereich aufgenommen wird. Dabei handelt es sich um das gemeinsame Spektrum der Rubidium-Isotope  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$ . Das Termschema von Rubidium ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Termschema der Rubidiumisotope  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  [6].

Da die mittlere Wellenlänge über die Verstärkung des Mediums auf 780 nm gelegt wird, lassen sich Übergänge der  $5S_{1/2}$ -Schale beider Rubidium-Isotope betrachten. Beträgt die Energie der durch den Laser ausgesandten Photonen etwa dem Abstand zweier Energieniveaus der Hyperfeinstruktur, so lassen sich die Elektronen vom niedrigeren ins höhere Niveau anheben. Dabei nehmen sie die Energie der Photonen auf, sodass nach dem Durchgang durch die Rubidium-Zelle deutlich weniger Photonen detektiert werden, sobald nahe oder genau bei der Übergangsenergie gelaset wird. Die Breite der Absorptionskanten (welche aufzeigt, dass die Energie der Photonen nicht genau gleich der Energiedifferenz zwischen den Niveaus sein muss) lässt sich durch die natürliche Linienbreite oder die Dopplerverbreiterung erklären. Bei ersterer kommt es aufgrund der Energieunschärfe des betrachteten, instabilen, quantenmechanischen Systems zu einer endlichen Breite der Absorptionskante, wohingegen die Dopplerverschiebung eine Verbreiterung aufgrund des Doppler-Effektes, also einer Verschiebung der Frequenz durch

die Bewegung der Teilchen beschreibt. Das aufgenommene Absorptionsspektrum sollte dem in Abbildung 10 dargestellten ähneln.

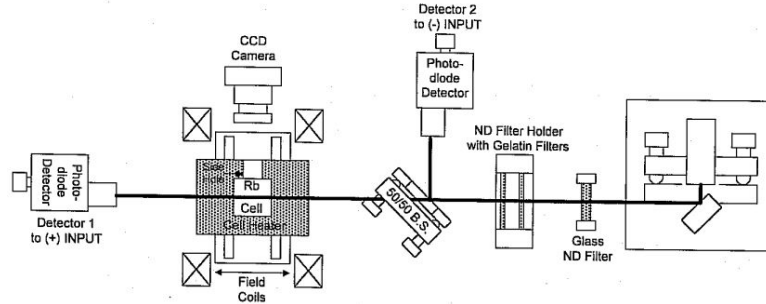


**Abbildung 10:** Teil des Absorptionsspektrums der Rubidiumisotope  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  [3].

### 3 Versuchsdurchführung

Um kohärente Strahlung zu erzeugen, ist es notwendig den Laser sorgfältig einzustellen. Nachdem die Verkabelung zwischen Diodenlaser und Lasercontroller überprüft und eine Kammertemperatur von  $50^\circ\text{C}$  festgestellt wurde, wird der Schwellenstrom zur Inbetriebnahme des Lasers ermittelt. Dazu wird die emittierte Strahlung auf einem Schirm gelenkt und mithilfe einer Infrarot-Kamera sichtbar gemacht. Der Laserstrom wird soweit erhöht bis ein typisches Lichtgranulationsbild (*engl.: speckle pattern*) erkennbar ist. Unterhalb des Schwellenstroms agiert die Laserdiode als LED (*light emitting diode*) und nicht als Laser.

Anschließend wird der externe Resonator (*engl.: external cavity*) eingestellt. Hierzu kann mithilfe zweier Drehknöpfe das Diffraktionsgitter justiert werden, welches das eine Ende des Resonators darstellt.



**Abbildung 11:** Versuchsaufbau zur Differenzmessung nach simultaner Manipulation von Piezosignal und Diodenstrom.

Unter Verwendung eines Piezo-Moduls und einem Rampengenerator mit einer Frequenz  $f = 10 \text{ Hz}$  kann der externe Resonator und somit die Wellenlänge der Strahlung variiert werden. Um das Absorptionsspektrum darzustellen wird im späteren Verlauf des Experiments eine zweite Photodiode verwendet. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 11 zu sehen. Die emittierte Strahlung des Diodenlasers wird mithilfe eines Strahlteilers (*engl.: beam splitter*) zum Einen auf die Photodiode hinter der Rubidiumzelle und zum anderen direkt auf die zweite Photodiode gelenkt. Mithilfe der Laserapparatur werden beide Signale voneinander subtrahiert und auf einem Oszilloskop dargestellt. Die einzelnen Versuchsteile werden aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit in Abschnitt 4 im Zusammenhang mit den Ergebnissen tiefer erläutert.

## 4 Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Versuchs erläutert.

### 4.1 Laserbetrieb

Um den benötigten Strom zu ermitteln wurde, wie in Abschnitt 3 beschrieben, der Betriebsstrom soweit erhöht bis eine charakteristische Lichtgranulation beobachtet werden kann. Das kohärente Licht trifft dabei auf die raue Oberfläche der Papierkarte und wird an dieser gestreut. Die gestreute Strahlung interferiert anschließend miteinander und das charakteristische Muster entsteht. Unterhalb der Schwelle für den Laserbetrieb agiert die Laserdiode als LED. Die von der LED emittierte Strahlung besitzt eine größere spektrale Breite und erzeugt somit weniger kohärentes Licht. Aus diesen Gründen ist das Muster im LED-Betrieb nicht zu erkennen. [5]

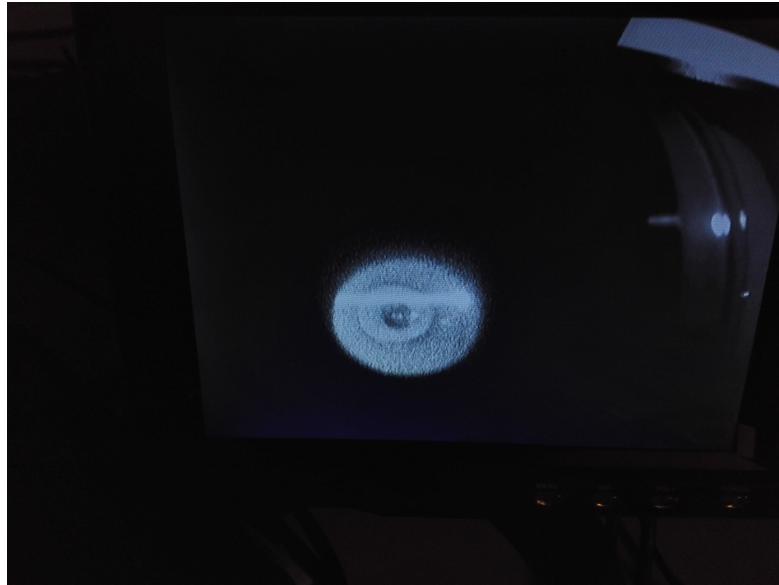
Das Specklemuster wurde bei einem Schwellenstrom von  $I_S = 3,2 \text{ A}$  beobachtet. Mithilfe eines Voltmeters wurde die zugehörige Schwellenspannung von  $U_S = 3,3 \text{ V}$  abgelesen.

### 4.2 Beobachtung der Rubidium Fluoreszenz

Nachdem der externe Resonator justiert wurde, wird Betriebsstrom und -spannung bis zum Auftreten von Fluoreszenzerscheinungen erhöht. Für die Parameter bei Beobachtung

gilt  $I_F = 4,8 \text{ A}$  bzw.  $U_F = 4,8 \text{ V}$ . Eine Erhöhung des Betriebsstroms resultiert in einer erhöhten Intensität. Gleichzeitig kommt es zu einer Erwärmung des Diodenmaterials. Hierdurch verändert sich die Bandlücke des Halbleiters und es kommt zu einer Veränderung der emittierten Wellenlänge. Des Weiteren verändert sich der Brechungsindex des Halbleiters und somit auch der freie Spektralbereich des Lasers.

Das Auftreten der Fluoreszenz wurde mithilfe einer Kamera dokumentiert und ist in Abbildung 12 abgebildet. Die Rubidiumatome werden vom emittierten Licht angeregt und emittieren ihrerseits Photonen, welche sich als heller Lichtstrahl beobachten lassen.



**Abbildung 12:** Fotoaufnahme der Rubidium Fluoreszenz.

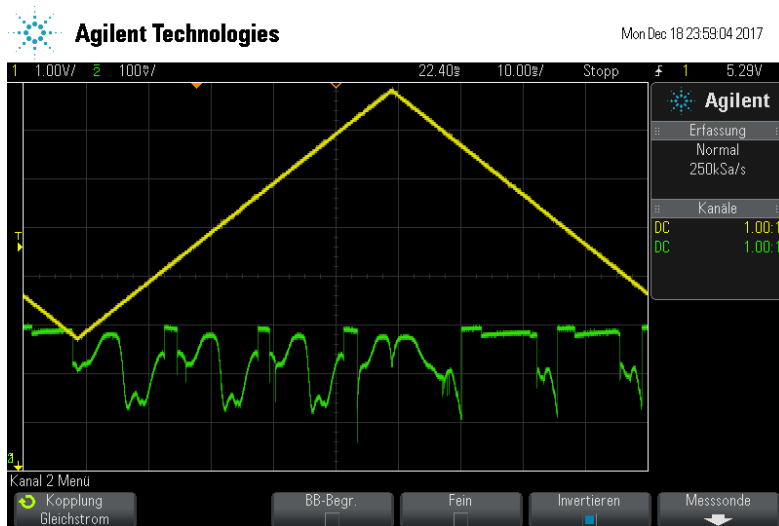
Die emittierte Wellenlänge liegt im Bereich des sichtbaren Lichts.

### 4.3 Sichtbarmachung des Absorptionsspektrums von Rubidium

Um das Absorptionsspektrum mithilfe eines Oszilloskops darzustellen, wird zunächst eine Photodiode in den Strahlengang hinter der Rubidiumzelle eingebracht. Die Verstärkung der Photodiode wurde dabei so eingestellt, dass das detektierte Signal maximal ist, sich aber unterhalb der Sättigungsspannung der Photodiode befindet.

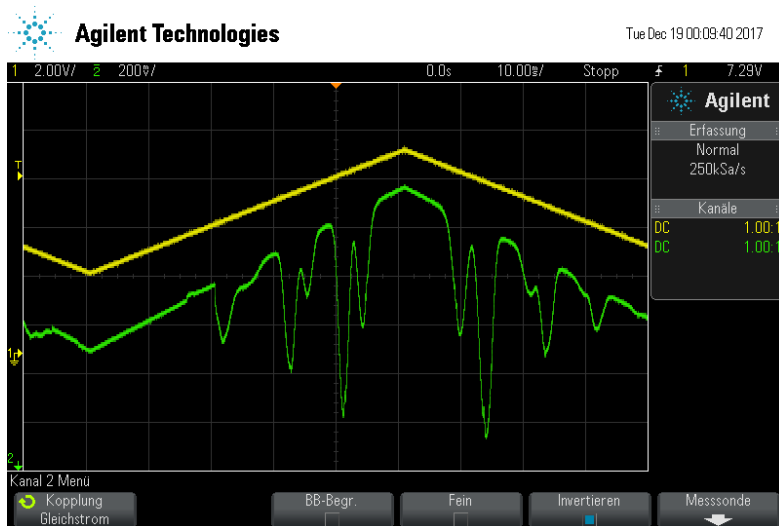
Damit die verschiedenen Absorptionsstellen erkennbar gemacht werden können, wird zunächst die Wellenlänge des Lasers variiert. Dies wird durch den Einsatz eines piezoelektrischen Wandlers (*engl.: piezo-electric transducer*) realisiert, der die Position des Gitters, welches das eine Ende des externen Resonator bildet, und somit die Wellenlänge verändert. Der Wandler wirkt somit auf den externen Resonator.

In der nachfolgenden Abbildung 13 ist das Photodiodensignal (grün) sowie das Signal des Piezo-Monitors (gelb) dargestellt.



**Abbildung 13:** Darstellung des Piezo-Monitor- (gelb) sowie Photodiodensignals (grün) am Oszilloskop.

Hier lassen sich bereits Kanten in der detektierten Intensität auf Grund von Absorptionsprozessen erkennen. Die von der Laserdiode emittierte Intensität ändert sich dabei nicht, da der Diodenstrom nicht verändert wird. Die Unstetigkeitsstellen des Photodiodensignals lässt sich auf Modensprünge zurückführen. Der Laser emittiert Strahlung in der Mode mit dem höchsten *Gain*, welcher der Überlagerung zwischen internem und externem Resonator resultiert (Vgl. Abbildung 8). Um dieses Problem zu beseitigen und um einen größeren Wellenlängenbereich zu untersuchen, muss der interne Resonator ebenfalls manipuliert werden. Dies wird durch die Variation des Diodenstroms umgesetzt. In der nachfolgenden Abbildung 14 ist das Bild des Oszilloskops bei gleichzeitiger Diodenstromerhöhung sowie Piezomodulation dargestellt.

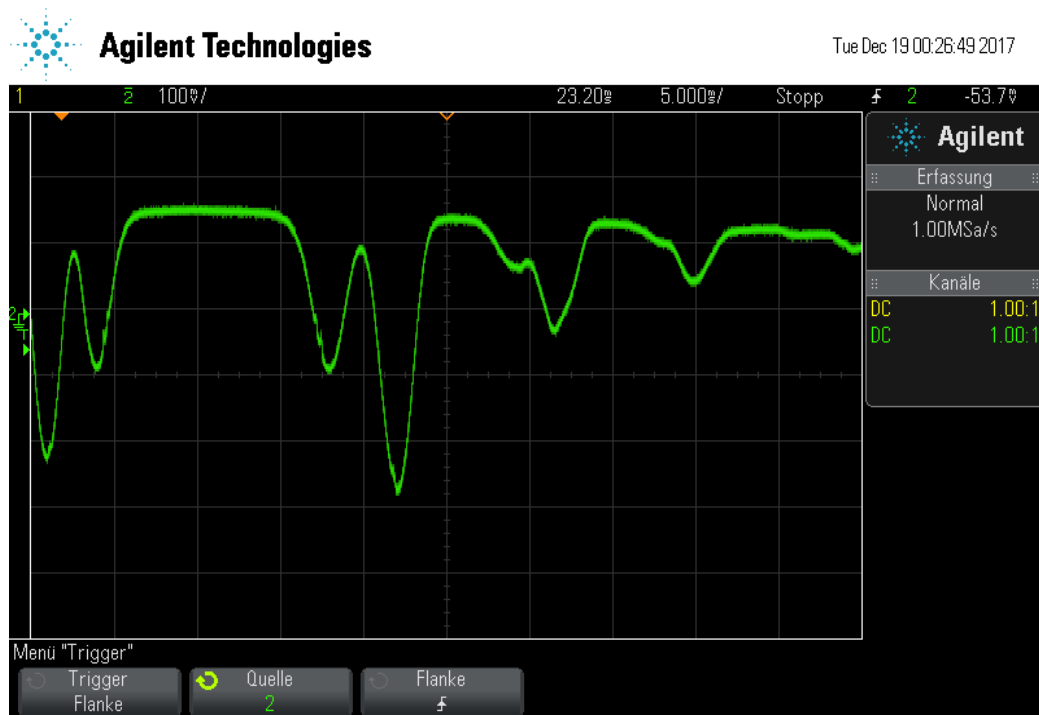


**Abbildung 14:** Simultane Modulation des Piezocontrollers sowie des Diodenstroms.

Auf dem Bild ist im Vergleich zu Abbildung 13 ein Anstieg der Photodiodenspannung zu erkennen. Diese resultiert aus dem Laserdiodenstrom, der simultan zum Piezosignal erhöht wird. Des Weiteren sind keine Modensprünge mehr erkennbar, da der interne sowie externe Resonator simultan manipuliert wird.

Um den Anstieg der emittierten Intensität und das damit gesteigerte Signal der Photodiode zu korrigieren, wird eine zweite Photodiode in den Versuchsaufbau eingebracht (Vgl. Abbildung 11). Mithilfe eines Strahlenteilers wird die emittierte Intensität auf die beiden Photodioden gelenkt. Dabei detektiert die zweite Photodiode den Teil der emittierten Intensität, welche nicht durch die Rubidiumzelle geleitet wird. Somit wird ein Signal mit Absorptionsprozessen und eins ohne gemessen. Diese beiden Signale werden mithilfe der Versuchsapparatur voneinander subtrahiert. Damit Signale identischer Größe subtrahiert werden, kann das resultierende Signal an der Apparatur abgeglichen werden. Nachdem die Justierung erfolgreich durchgeführt wurde, kann das Absorptionsspektrum von Rubidium qualitativ am Oszilloskop dargestellt werden. In der nachfolgenden Abbildung 15 ist das Ergebnis dieses Versuchs dargestellt.





**Abbildung 15:** Differenzsignal am Oszilloskop, welches mithilfe zweier Photodioden aufgenommen wurde.

Die Absorptionskanten 85 a, 85 b, 87 a und 87 b aus Abbildung 10 lassen sich am Oszilloskop wieder erkennen.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Das Ziel dieses Versuchs war die Darstellung des Absorptionsspektrum von Rubidium. Dazu wurde elektromagnetische Strahlung mithilfe eines Diodenlasers im gewünschten Wellenlängenbereich von  $\lambda \approx 780 \text{ nm}$  erzeugt. Die Hauptaufgabe des Experiments bestand in der Justierung des internen und externen Resonators der verwendeten Laserapparatur. Um die Rubidiumatome anzuregen und Fluoreszenz sichtbar zu machen, wurde die Wellenlänge des Lasers durch Steuerung des Diodenstroms variiert. Hierbei bestand die Schwierigkeit darin, die genaue Stromstärke zu ermitteln und einzustellen. Damit die Wellenlänge des Lasers in dem Bereich der Absorptionskanten verändert werden kann, wurde zusätzlich der externe Resonator über eine Piezo-Steuerung manipuliert. Dies erforderte Feinjustierungen an den horizontalen bzw. vertikalen Stellschrauben des Gitters.

Zur Darstellung des Absorptionsspektrum und Beseitigung von Artefakten durch Modensprünge, wurde der Diodenstrom simultan zur Piezo-Steuerung variiert. Hierbei mussten eine Reihe von Parameter der einzelnen Bestandteile aufeinander abgestimmt werden. Durch die Erhöhung des Diodenstroms wurde neben der Veränderung der Wellenlänge durch die Piezo-Steuerung auch eine Veränderung der Intensität hervorgerufen.

Ein anschließendes Differenzverfahren mithilfe einer weiteren Photodiode erwies sich als erfolgreich, um das Absorptionsspektrum ohne Modensprünge sowie Intensitätsfluktuationen zu beobachten.

Das Verfahren eignet sich allein zur qualitativen Darstellung des Absorptionsspektrums. Eine genaue Analyse der Absorptionskanten (z.B. Bestimmung der Wellenlängen) ist nicht möglich.

## Literatur

- [1] TU Braunschweig. *Laser*. 27. Dez. 2017. URL: [http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4/Kap\\_III/Laser.htm](http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4/Kap_III/Laser.htm).
- [2] chemie-schule.de. *p-n-Übergang*. 27. Dez. 2017. URL: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/P-n-%C3%9Cbergang>.
- [3] TU Dortmund. *Diode Laser Physics*.
- [4] H. Föll. 8.2.4 *Merkmale zu Kapitel 8.2: Bändermodell und Materialeigenschaften*. 27. Dez. 2017. URL: [https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw\\_for\\_et/kap\\_8/backbone/r8\\_2\\_4.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw_for_et/kap_8/backbone/r8_2_4.html).
- [5] Patrick Herzog. "LED- oder Laserlinie zur strukturierten Beleuchtung?" In: *Optik Photonik* 4.1 (2009), S. 40–41. ISSN: 2191-1975. DOI: 10.1002/opph.201190007. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/opph.201190007>.
- [6] University of Minnesota. *Saturated Absorption Spectroscopy*. 27. Dez. 2017. URL: [https://sites.google.com/a/umn.edu/mxp/home/2016-Spring/s16\\_saturatedabsorptionspectroscopy](https://sites.google.com/a/umn.edu/mxp/home/2016-Spring/s16_saturatedabsorptionspectroscopy).
- [7] ResearchGate. *Littrow Configuration*. 29. Dez. 2017. URL: [https://www.researchgate.net/figure/fig-1-Color-online-Schematic-of-a-Littrow-configuration-ECDL-showing-the-laser-diode\\_234130516\\_fig1](https://www.researchgate.net/figure/fig-1-Color-online-Schematic-of-a-Littrow-configuration-ECDL-showing-the-laser-diode_234130516_fig1).
- [8] S. Stützer. *Zusammenfassung Diodenlaser*. 27. Dez. 2017.
- [9] D. Suter. *7 Halbleiter*. 27. Dez. 2017.