

v60

Der Diodenlaser

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.06.2023

Abgabe: 13.07.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Absorption und Emission von Photonen	3
2.2 Dotierung und Dioden	4
2.3 Aufbau des Diodenlasers	5
2.4 Absorptionsspektrum von Rubidium	7
3 Durchführung	7
3.1 Lasergranulation	7
3.2 Aufnahme der Rubidiumfluoreszenz	8
3.3 Transmissionsspektrum der Rubidiumzelle	9
4 Auswertung	10
4.1 Schwellenstrom	10
4.2 Rubidiumfluoreszenz	11
4.3 Transmissionsspektrum	12
5 Diskussion	13
Literatur	13

1 Zielsetzung

Laser stellen für die Physik ein sehr wichtiges Instrument dar. Durch ihren Ausstoß von kohärentem Licht in einem sehr kleinen Frequenzspektrum eignen sie sich ideal, um zum Beispiel atomare Strukturen zu untersuchen. In diesem Versuch soll konkret die Funktionsweise eines Diodenlasers erprobt werden. Hierfür wird dieser verwendet, um Rubidium zu untersuchen und seine Fluoreszenz nachzuweisen.

2 Theorie

Es bedarf dafür zunächst einer Erläuterung der physikalischen Grundlagen, die zum Verständnis der Funktionsweise des Diodenlasers notwendig sind. Es handelt sich hierbei um das Konzept der Photonenemission sowie der Funktionsweise von Halbleitern und Dioden.

2.1 Absorption und Emission von Photonen

Ein quantenmechanisches System kann nicht beliebige Energien annehmen. Es liegen lediglich verschiedene diskrete Energieniveaus vor, zwischen denen Übergänge stattfinden können. Ein Beispiel hierfür wäre ein Atom, welches ein Photon absorbiert und dadurch in einen angeregten Zustand mit höherer Energie wechselt. Voraussetzung hierfür ist, dass die Energie des Photons exakt der Differenz beider Energieniveaus entspricht.

Befindet sich das Atom im angeregten Zustand, gibt es nun zwei Möglichkeiten, wie es in seinen Grundzustand zurückkehren kann. Zum einen ist eine spontane Emission eines Photons möglich. Diese wird lediglich durch Quantenfluktuationen ausgelöst und ist nicht vorherzusagen. Die Energie des hierbei emittierten Photons entspricht exakt der Energiedifferenz von angeregtem Zustand und Grundzustand. Seine Ausbreitungsrichtung, Polarisation und Phase sind hierbei beliebig.

Wechselwirkt das angeregte Atom jedoch mit einem Photon der richtigen Energie, kann es auch zu stimulierten Emissionen kommen. Die hierfür notwendige Energie des einfallenden Photons ist erneut die Differenz der beiden Energieniveaus. Auch hierbei wird ein Photon identischer Energie emittiert, das sich aber im Gegensatz zur spontanen Emission immer in Richtung des einfallenden Photons bewegt und sich auch in Phase und Polarisation nicht von diesem unterscheidet.

Es kann also durch stimulierte Emission die Anzahl an Photonen einer bestimmten Wellenlänge stark verstärkt werden. Genau dieser Prozess wird sich im aktiven Medium eines Lasers zu Nutzen gemacht. Damit die stimulierte Emission im Gegensatz zur spontanen Emission dominiert, muss ein Zustand erreicht werden, bei dem der energetisch höherer Zustand häufiger besetzt ist als der Grundzustand. Ein solcher Zustand wird auch Besetzungsinversion genannt.

Um eine Besetzungsinversion zu erreichen, sind jedoch mehr als zwei Zustände nötig. Dies liegt daran, dass die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen zwei Zuständen gleich ist, unabhängig davon, von welchem Zustand ausgegangen wird. Dies hat zur Folge, dass in einem Zwei-Niveau-System keine Besetzungsinversion, sondern höchstens eine

gleichmäßige Besetzung beider Zustände, erreichbar ist. Das einfachste System, für das dies hingegen möglich ist, ist demnach ein Drei-Niveau-System. Eine schematische Darstellung eines solchen ist in Abbildung 1 zu sehen.

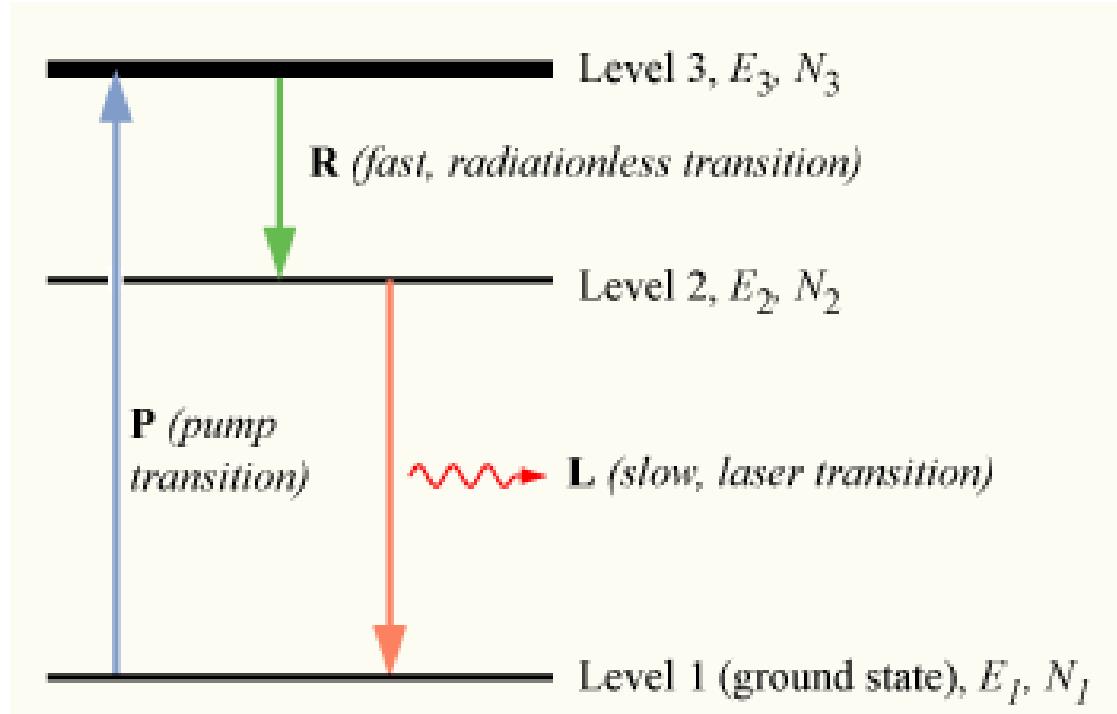


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Drei-Niveau-Systems [1].

In einem System wie diesem ist es möglich, dass ein Großteil der Teilchen sich außerhalb des Grundzustands befindet, insofern das mittlere Energieniveau langlebiger ist als das höchste. Falls dies der Fall ist, werden sich die Teilchen langfristig im mittleren Niveau ansammeln, da mehr Teilchen aus dem hohen in den mittleren Zustand übergehen als solche, die vom mittleren in den Grundzustand übergehen.

2.2 Dotierung und Dioden

Von einem dotierten Halbleiter ist die Rede, wenn in einen Halbleiter Fremdatome eingebracht werden, um seine Leitfähigkeit zu beeinflussen. Es wird prinzipiell zwischen n-dotierten und p-dotierten Halbleiter unterschieden. Relevant dafür ist die Anzahl an Valenzelektronen der Elemente des Halbleiters und der Fremdatome. Werden Fremdatome in einen Halbleiter hinzugefügt, die ein Valenzelektron mehr haben als die Atome des Halbleiters, wird dies als n-Dotierung bezeichnet, da durch das Hinzufügen ein freies Elektron, also eine freie negative Ladung entsteht. Bei der p-Dotierung hingegen wird ein Fremdatom mit einem Valenzelektron weniger hinzugefügt, wodurch ein sogenanntes Elektronenloch im Halbleiter entsteht. Dieses Loch wiederum ist auch frei beweglich und verhält sich wie eine freie positive Ladung.

Werden nun ein p-dotierter Halbleiter und ein n-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht, so ist die Rede von einem pn-Übergang. Ein solcher pn-Übergang bildet den Kern einer Diode. An der Fläche, an der sich die verschiedenen dotierten Halbleiter berühren, können sich die Elektronen zwischen den Halbleitern frei bewegen. Dies hat zur Folge, dass im n-dotierten Teil eine positiv geladene Zone und im p-dotierten Teil eine negativ geladene Zone entsteht. Aufgrund der Coulomb-Abstoßung werden dann neu entstehende freie Ladungen aus dem pn-Übergang gesaugt, weshalb der pn-Übergang als Isolator fungiert und auch als Sperrschicht bezeichnet wird.

Durch Anlegen einer Spannung an die Diode können, abhängig von der Polung, zwei Dinge passieren. Wird die n-dotierte Seite mit dem negativen Pol verbunden, führt dies in der Diode zu einem elektrischen Feld, das dem Feld in der Sperrschicht entgegengesetzt ist. Ab einer gewissen Spannung gleichen sich diese Felder genau aus und für noch höhere Spannungen kann dann Strom durch die Diode fließen. Eine Diode, an der eine so gepolte Spannung anliegt, ist in Abbildung 2 zu sehen.

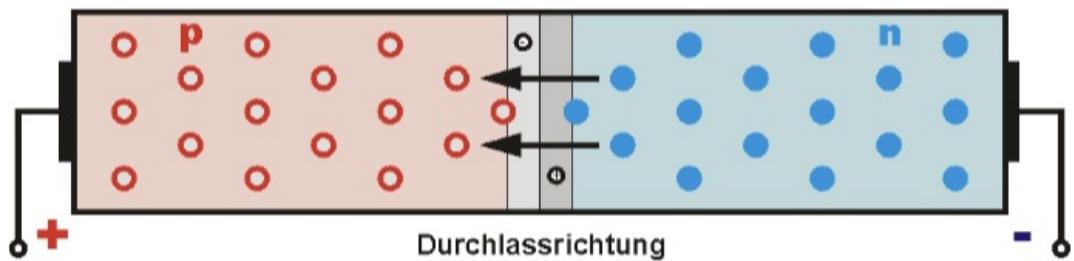


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Diode in Durchlassrichtung [2].

Eine gegensätzlich gepolte Spannung hingegen würde das in der Diode vorhandene Feld nur verstärken. In dieser Richtung ist also auch für höhere Spannungen kein Stromfluss möglich.

Wird die Diode in Durchlassrichtung gepolt, führt dies dazu, dass Elektronen durch den p-dotierten Halbleiter fließen und dort mit den Elektronenlöchern rekombinieren. Durch diesen Prozess werden Photonen emittiert. Bei einer ausreichend hohen Spannung kann dies zu einer Besetzungsinversion führen. Dadurch wird stimuliertes Emission in der Diode möglich und es kann kohärentes Licht hoher Intensität entstehen.

2.3 Aufbau des Diodenlasers

Das wichtigste Bauteil des Diodenlasers ist sein Chip. Eine schematische Darstellung der Seitenansicht eines solchen ist in Abbildung 3 zu sehen.

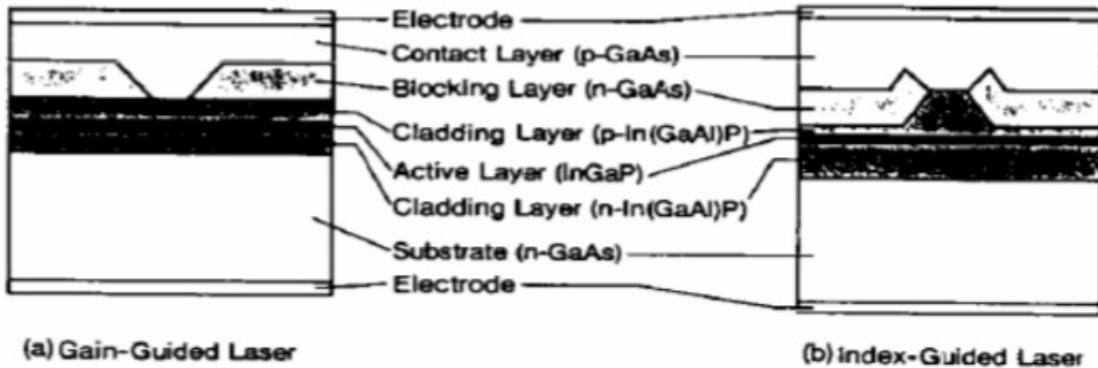


Abbildung 3: Seitenansicht eines Dioden Chips [3].

Den Kern des Chips bildet der pn-Übergang, der für Diodenlaser als aktives Medium (Active Layer) fungiert. Umgeben ist dieser von p-dotierten und n-dotierten Schichten (Cladding Layers). Der Querschnitt wird zu einer Seite hin von einem undurchlässigen Reflektor begrenzt. Zur anderen Seite hin ist die Begrenzung halbdurchlässig, um einen Teil des Lasers auszukoppeln und nutzbar zu machen. Da sich zwischen den beiden Begrenzungen stehende Wellen bilden, wird dieser Teil des Chips auch interner Resonator genannt. Es kann so hier zu stimulierten Emissionen kommen und der Laser sich so stetig verstärken.

Der Teil des Laserstrahls, der aus dem Chip ausgekoppelt wird, durchläuft anschließend den sogenannten Littrow-Aufbau. Die Skizze eines solchen ist in Abbildung 4 zu sehen.

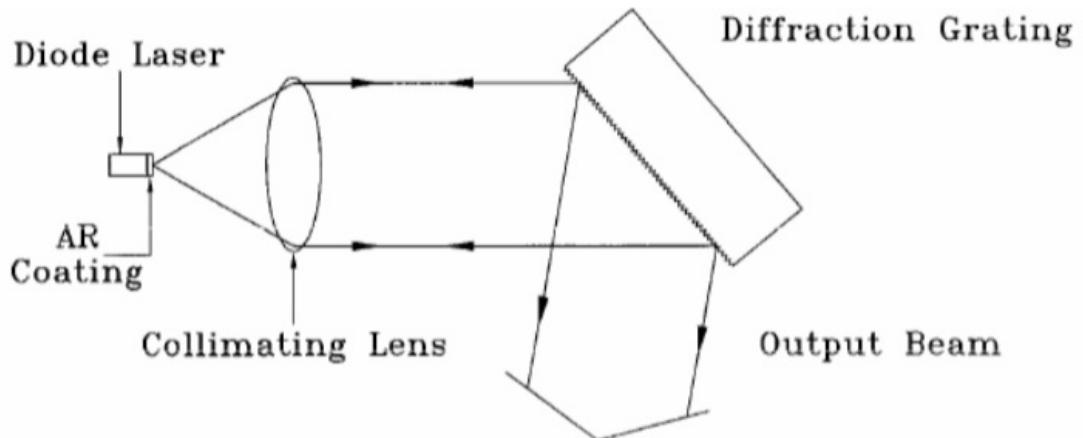


Abbildung 4: Skizze eines Littrow-Aufbaus [3].

Der ausgetretene Strahl durchläuft zunächst eine Kollimator-Linse. Diese transformiert den Strahl zu einer planaren Wellenfront. Die Wellenfront trifft dann auf ein Beugungsgitter, welches in einem präzisen Winkel angeordnet ist, um exakt die erste Beugungsordnung zurück in den Laser zu reflektieren. Es bildet sich so zwischen Gitter und hinterer,

undurchlässiger Begrenzung des Chips eine weitere stehende Welle, weshalb dieser Teil auch als externer Resonator bezeichnet wird. Die nullte Ordnung, oder direkte Reflexion, ist dann der final ausgegebene Laser.

2.4 Absorptionsspektrum von Rubidium

Durchläuft ein Laserstrahl ein Rubidiummedium werden ein Teil seiner Photonen von diesem absorbiert. Die Energieniveaus in Rubidium sind zusammen mit dem erwarteten Absorptionsspektrum von Rubidium in Abbildung 5 dargestellt.

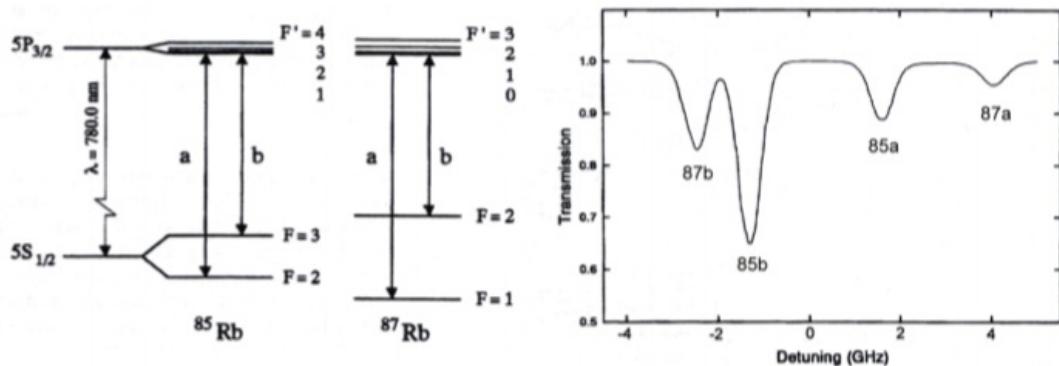


Abbildung 5: Aufbau des Versuches [3].

Hierbei können, wie bereits in Unterabschnitt 2.1 beschrieben, nur solche Photonen absorbiert werden, deren Energie der Differenz zweier Energieniveaus in Rubidium entspricht. Dies hat zur Folge, dass nur bei genau diesen Wellenlängen ein Einbruch in der Intensität des Lasers messbar ist.

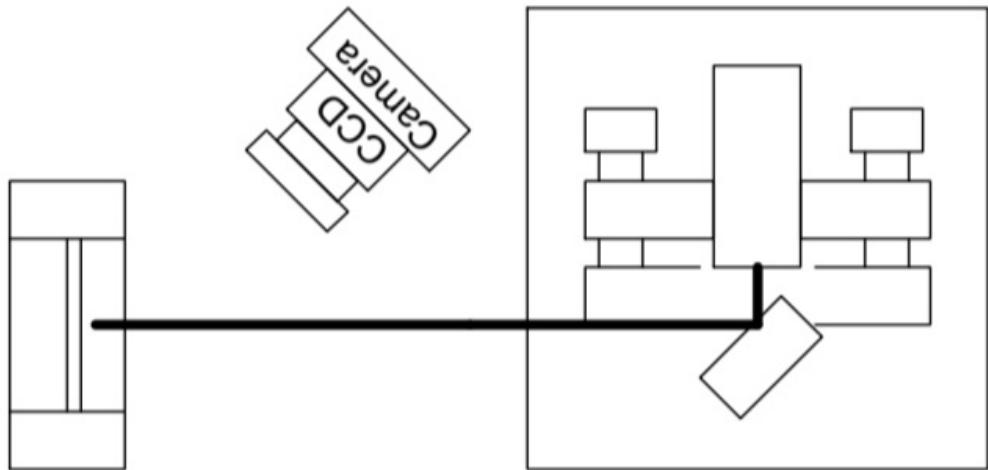
3 Durchführung

Bei diesem Versuch werden drei Messungen durchgeführt, für die unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet werden. Es wird für alle Messungen ein Diodenlaser nach Littrow-Aufbau verwendet. Es ist für die Durchführung des Versuches darauf zu achten, diese in einem abgedunkelten Raum durchzuführen. Ebenfalls ist es von Wichtigkeit, während des gesamten Versuches Schutzbrillen zu tragen.

3.1 Lasergranulation

Als erste Messung in diesem Versuch soll mit Hilfe der Lasergranulation der Schwellenstrom des Lasers bestimmt werden. Wenn das Licht des Lasers auf eine Oberfläche trifft, die Unebenheiten in der Größenordnung der Wellenlänge des Lasers aufweist, dann entstehen an diesen Unebenheiten neue Kugelwellen. Aufgrund der Unebenheit entsteht so ein zufälliges Interferenzmuster, welches in Form eines körnigen Lichtflecks sichtbar wird. Voraussetzung dafür ist, dass sich der Laser nicht mehr im LED-Bereich befindet und

sein Licht daher ausreichend kohärent ist. Der minimal nötige Strom, um den Laser in diesen Zustand zu bringen wird als Schwellenstrom bezeichnet. Der verwendete Aufbau um diesen zu bestimmen ist in Abbildung 6 dargestellt.



**Buisness Card
in Card Holder**

Abbildung 6: Der zur Bestimmung des Schwellenstroms verwendete Aufbau [3].

Das Gitter wird zunächst so eingestellt, dass das Licht des Lasers auf der Detektorkarte sichtbar wird. Es wird dann eine Kamera auf die Detektorkarte ausgerichtet. Im Anschluss wird der Strom des Lasers langsam erhöht, bis durch die Kamera die ersten Effekte der Lasergranulation sichtbar werden. Diese werden fotografiert und der dafür eingestellte Strom als Schwellenstrom notiert.

3.2 Aufnahme der Rubidiumfluoreszenz

Im nächsten Teil des Versuches soll die Fluoreszenz von Rubidium abgebildet werden. Hierfür wird der in Abbildung 7 dargestellte Aufbau verwendet. Dabei wird der Laser mit einem höheren Strom als dem Schwellenstrom betrieben.

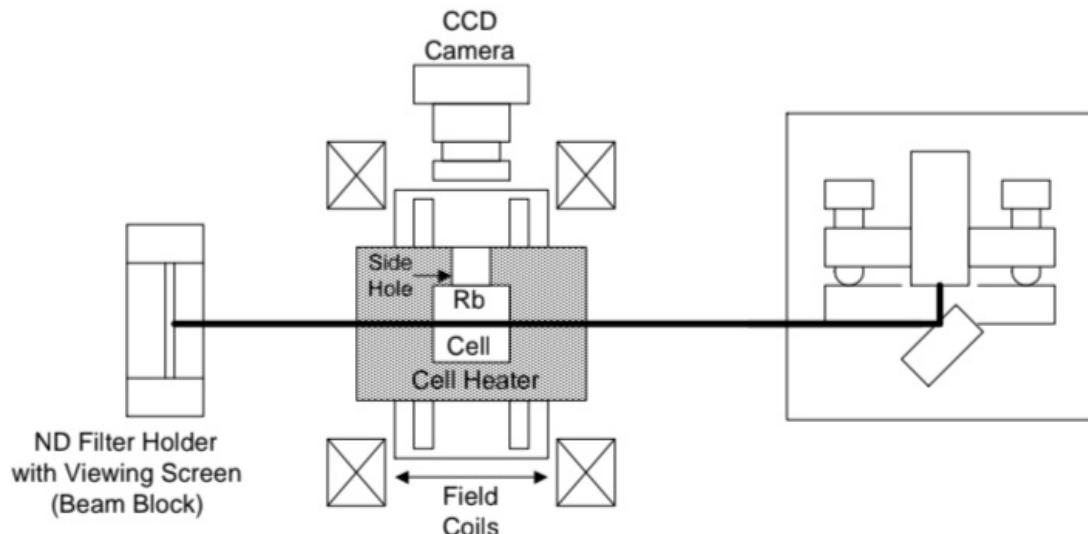


Abbildung 7: Der zur Aufnahme der Rubidiumfluoreszenz verwendete Aufbau [3].

Die Kamera wird transversal zur Rubidiumzelle auf diese gerichtet. Der Laserstrahl wird auf die Rubidiumzelle gerichtet, um das Rubidium anzuregen. Dafür ist jedoch eine bestimmte Wellenlänge nötig. Diese kann über das winkelverstellbare Gitter und den Strom des Piezokristalls variiert werden. Sobald die Rubidiumfluoreszenz auf der Kamera sichtbar wird, wird diese fotografiert.

3.3 Transmissionsspektrum der Rubidiumzelle

Für die Aufnahme des Transmissionsspektrums der Rubidiumzelle wird vor dieser ein 50/50-Strahlteiler platziert. Beide Strahlen treffen dann auf Photodioden, wobei nur einer von beiden davor die Rubidiumzelle durchläuft. Die Signale der Photodioden gehen dann an einen Funktionsgenerator. Der finale Aufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

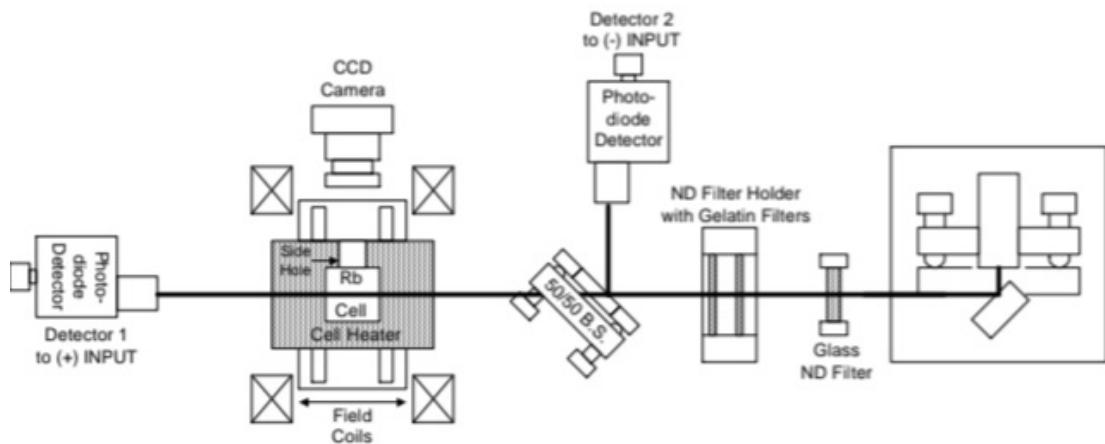


Abbildung 8: Der zur Aufnahme des Transmissionsspektrums verwendete Aufbau [3].

Das Teilen der Strahlen ist wichtig, um den Untergrund herauszufiltern und so den Effekt der Rubidiumzelle zu isolieren. Das Transmissionsspektrum kann dann an einem Oszilloskop abgelesen und abfotografiert werden.

4 Auswertung

4.1 Schwellenstrom

Zur Auswertung des Schwellenstromes des Diodenlasers wird der Strom langsam aufgedreht, bis die charakteristische Lasergranulation auftritt. Im Versuch ergab sich ein Schwellenstrom von 34,4 mA.

Es wurden drei Fotografien des Displays der Infrarotkamera gemacht, die in Abbildung 9 abgebildet sind.

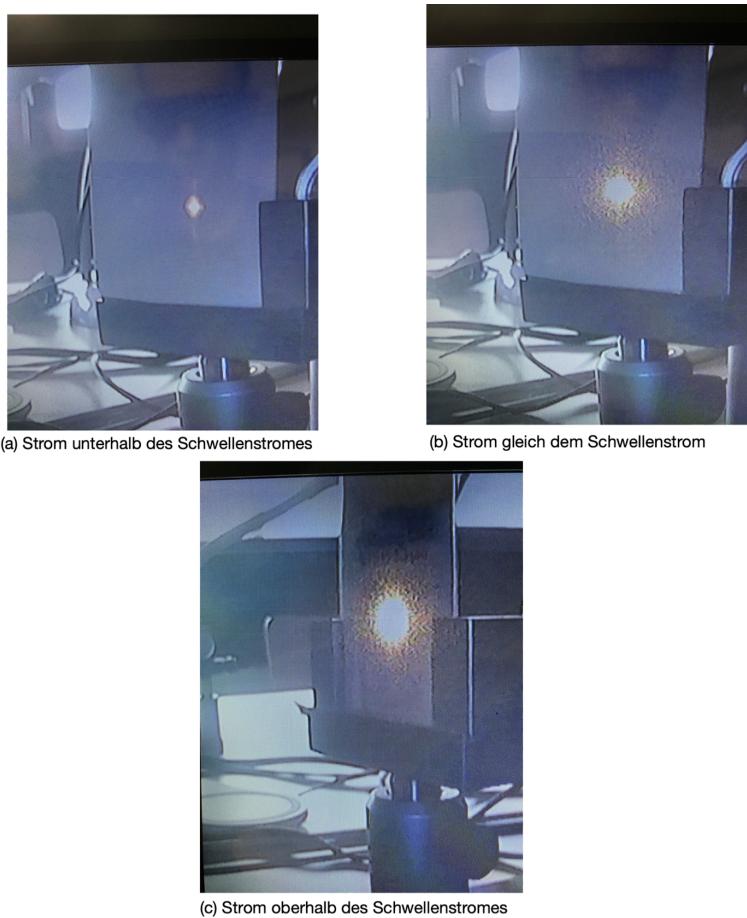


Abbildung 9: Fotografie des Displays der Infrarotkamera bei unterschiedlichen Strömen.

4.2 Rubidiumfluoreszenz

Wird der Laser auf das mit Rubidium gefüllte Gefäß gerichtet, kann die Rubidiumfluoreszenz beobachtet werden. Zur Auswertung wurde mit der Infrarotkamera ein Bild der Fluoreszenz aufgenommen und in Abbildung 10 dargestellt. Es ist eine gelbliche Linie zu erkennen, die durch die Rubidiumatome erzeugt wird, wenn sie innerhalb des Gefäßes mit dem Laser fluoreszieren.



Abbildung 10: Fotografie des Displays der Infrarotkamera der Rubidiumfluoreszenz.

4.3 Transmissionsspektrum

Zur Auswertung des Transmissionsspektrums von Rubidium wurde in Abbildung 11 eine Fotografie des Oszilloskopes erstellt, die das Transmissionsspektrum von Rubidium zeigt.



Abbildung 11: Fotografie des Transmissionsspektrums von Rubidium.

5 Diskussion

Abschließend kann gesagt werden, dass alle einzelnen Messabschnitte erfolgreich durchgeführt werden konnten. Der Schwellwert des Stromes wurde auf den Wert 34,4 mA gemessen und die Rubidiumfluoreszenz war ebenfalls eindeutig zu sehen. Das Transmissionsspektrum vom Rubidium stimmt mit der theoretischen Vorhersage überein und es konnte somit gezeigt werden, dass das untersuchte Material auch wirklich Rubidium ist.

Literatur

- [1] *Drei-Niveau-System*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Population_inversion.
- [2] *Diode in Durchlassrichtung*. URL: <https://technik.reicke.de/egrundlagen4.php>.
- [3] *v60 - Der Diodenlaser*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.