

Fortgeschrittenenpraktikum

V61 Der HeNe-Laser

Felix Gläsemann
felix.glaesemann@tu-dortmund.de

Tobias Brützel
tobias.bruetzel@tu-dortmund.de

Durchführung: 15.12.2021

Abgabe: 15.12.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Absorption und Emission von Photonen	3
2.1.1	Absorption	3
2.1.2	Emission	4
2.2	Erzeugung von Laserlicht	4
2.3	Stabilitätsbedingung	5
2.4	Moden	6
3	Aufbau und Durchführung	6
3.1	Aufbau der Messapparatur	6
3.2	Durchführung	6
4	Auswertung	8
4.1	Landé-Faktoren und Kernspins	8
4.2	Isotopenverhältnis	10
4.3	Quadratischer Zeeman-Effekt	10
5	Diskussion	11
	Literatur	11

1 Zielsetzung

Das Ziel des Versuches ist es, mithilfe eines Helium-Neon-Lasers die grundlegenden Eigenschaften und die Funktionsweise von Lasern kennen zu lernen. Dies sind Wellenlänge, Polarisation und Modenspektrum.

2 Theorie

Unter Laserstrahlung versteht man hochintensive, monochromatische elektromagnetische Wellen. Diese Wellen besitzen eine hohe Kohärenzlänge. Ein Laser ((L)ight (A)mplification by (S)timulated (E)mission of (R)adiation) besteht aus drei Komponenten. Diese sind eine Pumpquelle, ein aktives Lasermedium sowie ein Resonator. Dabei sind Pumpe und das aktive Medium für die Erzeugung des Strahls verantwortlich. Der Resonator besteht aus zwei Spiegeln, die den erzeugten Strahl sowohl teils als auch total reflektieren. Da so das Medium mehrmals vom Strahl durchlaufen wird, kann dieser stark verstärkt werden.

2.1 Absorption und Emission von Photonen

Es existieren drei wesentliche Wechselwirkungen für Photonen mit Materie, diese sind Absorption sowie spontane und stimulierte Emission. In Abbildung (1) sind diese schematisch dargestellt.

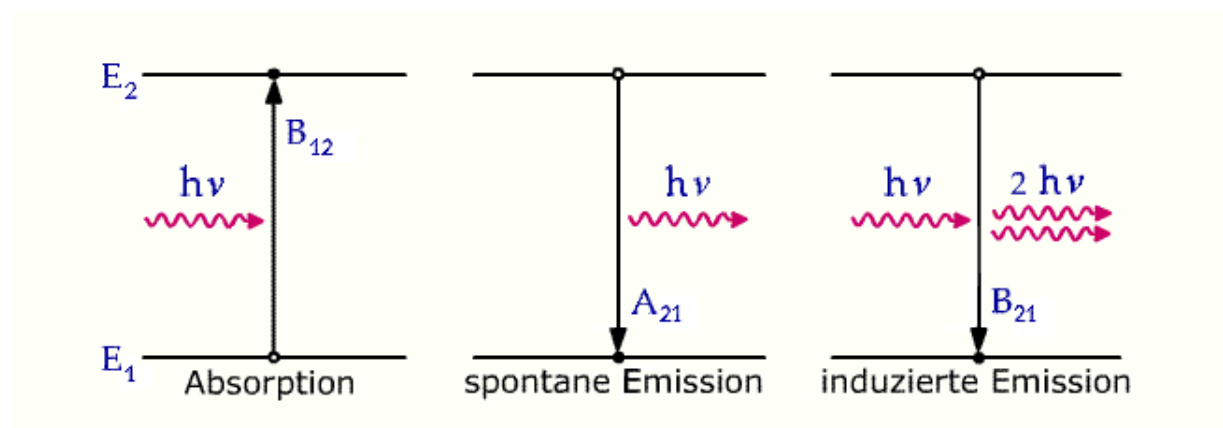


Abbildung 1: Schaubild für die drei verschiedenen Prozesse [3]

2.1.1 Absorption

Bei der Absorption wird ein Photon von einem Atom absorbiert. Bei diesem Prozess wird ein Elektron des Atoms in einen energetisch höheren Zustand angehoben, damit steigt die Energie des Elektrons und das Photon verschwindet. Dieser Prozess ist nur möglich wenn die Energie des Photons E größer ist als die Energiedifferenz zwischen Grund- und angeregtem Zustand ΔE .

2.1.2 Emission

Befindet sich ein Atom nun in einem angeregten Zustand kann es auf zwei verschiedene Arten abgeregt werden. Der erste Fall ist hier die spontane Emission, dies kann als umgekehrter Vorgang zur Absorption gesehen werden. Ein Elektron geht spontan aus einem energetisch höheren Zustand in einen energetisch niedrigen Zustand über, bei diesem Vorgang wird ein Photon emittiert mit der Energie $E = \Delta E$ der Energiedifferenz der beiden Zustände. Der in diesem Experiment relevante Fall ist jedoch die stimulierte Emission, denn auf ihr beruht die Funktionsweise des Lasers. Bei der stimulierten Emission wird eine Abregung aus dem höheren Zustand durch ein eingestrahltes Photon der Energie $E = \Delta E$ erzwungen. Dann wird zusätzlich ein Photon ausgesendet, das in Richtung, Phase und Energie äquivalent zum eingestrahlten Photon ist. Die Photonen vermehren sich also wie in Abbildung (1) zu sehen. Nur durch diese stimulierte Emission ist es möglich monochromatisches und kohärentes Licht zu verstärken und somit Laserlicht zu erzeugen.

2.2 Erzeugung von Laserlicht

Um Laserlicht mittels stimulierter Emission zu erzeugen muss im aktiven Medium eine Besetzungsinversion vorliegen, das heißt im energetisch höheren Niveau müssen sich mehr Teilchen befinden als im energetisch niedrigen Niveau. In einem Zwei-Niveau-System ist dieser Zustand jedoch nicht, da dort die Teilchen auch bei beliebig hoher Intensität im höheren Niveau immer weniger sein werden als im niedrigen Niveau. In einem Drei-Niveau-System oder Vier-Niveau-System ist dies jedoch möglich, eine Voraussetzung dafür ist eine hohe Intensität des Lichtes im Resonator. Dabei hat das Vier-Niveau-System den Vorteil, dass es unabhängig von der Intensität eine Besetzungsinversion erzeugen kann und somit sehr gut als Lasermedium genutzt werden kann. In Abbildung (2) ist dies schematisch dargestellt:

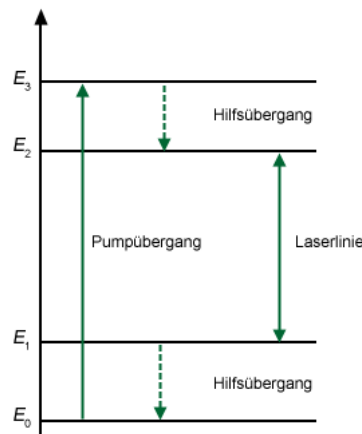


Abbildung 2: Vier-Niveau-System [1]

In diesem Versuch wird ein Helium-Neon-Laser betrachtet, dabei dient das Helium

als Pumpe und das Neon als Lasermedium. Zunächst werden die Heliumatome in einen energetisch hohen Zustand gebracht. Durch Stöße zweiter Art mit den Neon-Atomen wird in diesen eine Besetzungsinversion erzeugt, somit ist es nun möglich stabil mit den Photonen mit der richtigen Energie dort die stimulierte Emission auszulösen und Laserlicht zu erzeugen. Durch die Spiegel im Resonator werden die ausgelösten Photonen wieder durch das Lasermedium geleitet und es kommt zu einem Kaskadeneffekt der die Photonen vervielfältigt. Wie in Abbildung (3) zu sehen ist der Übergang von 5s nach 3p

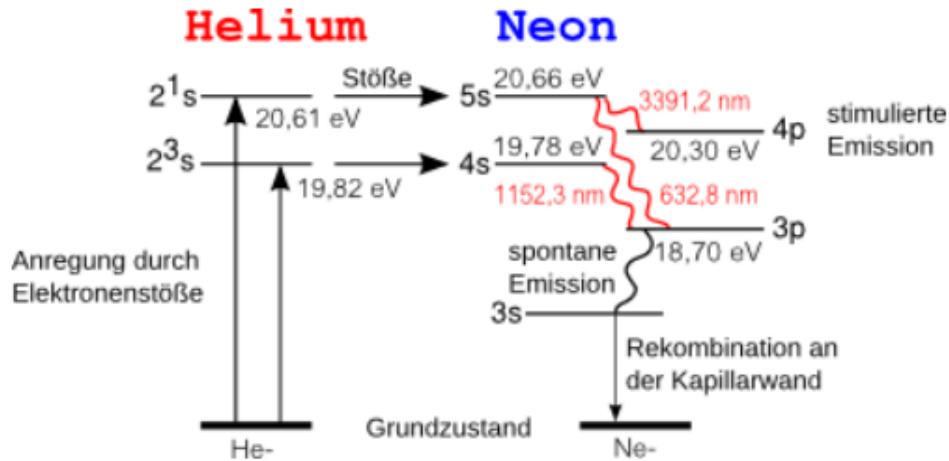


Abbildung 3: Funktionsweise des Helium-Neon-Laser [2]

der Neonatome für die rote Linie, das heißt Wellenlänge $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, verantwortlich.

2.3 Stabilitätsbedingung

Damit ein einfacher Resonator wie im Helium-Neon-Laser als stabil gilt muss die Stabilitätsbedingung gelten, diese lautet:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (1)$$

Mit den sogenannten g-Faktoren:

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i} \quad (2)$$

Dabei ist L die Länge des Resonators und R_i die Krümmungsradien der Resonatorspiegel. Es gibt vier Grenzfälle, diese sind konfokale Resonatoren ($g_i = 0$), hemisphärische Resonatoren ($g_1 = 0, g_2 = 1$), konzentrische Resonatoren ($g_i = -1$) und den sogenannten Fabry-Pérot-Resonator ($g_i = 1$).

2.4 Moden

Da die Resonatorlänge L im Vergleich zur Wellenlänge λ sehr groß ist, erfüllen mehrere Moden die Stabilitätsbedingung. Die Moden werden $\text{TEM}_{l,p,q}$ bezeichnet. Dabei sind

die Indize l und p die transversalen Knotenpunkte in x- bzw. y-Richtung und q die longitudinale Mode. Die Mode TEM_{00} heißt Grundmode und besitzt den größten Anteil am Modenspektrum ihre Intensität ist gegeben durch:

$$I_{00}(x) = I_0 \exp\left(\frac{-2(x - x_0)^2}{w^2}\right) \quad (3)$$

Im Auswertungsteil werden ebenfalls noch die Intensitäten für die Moden TEM_{01} (siehe Gleichung (4)) und TEM_{02} (siehe Gleichung (5)) verwendet:

$$I_{01}(x) = I_0 \frac{4(x - x_0)^2}{w^2} \exp\left(\frac{-2(x - x_0)^2}{w^2}\right) \quad (4)$$

$$I_{02}(x) = I_0 \left(\frac{8(x - x_0)^2}{w^2} - 2 \right)^2 \exp\left(\frac{-2(x - x_0)^2}{w^2}\right) \quad (5)$$

3 Aufbau und Durchführung

In diesem Abschnitt wird zunächst der Aufbau und die Einstellung der verwendeten Messapparatur beschrieben und anschließend die Durchführung des Experimentes dokumentiert.

3.1 Aufbau der Messapparatur

In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau zu sehen: Der Versuchsaufbau besteht wie oben

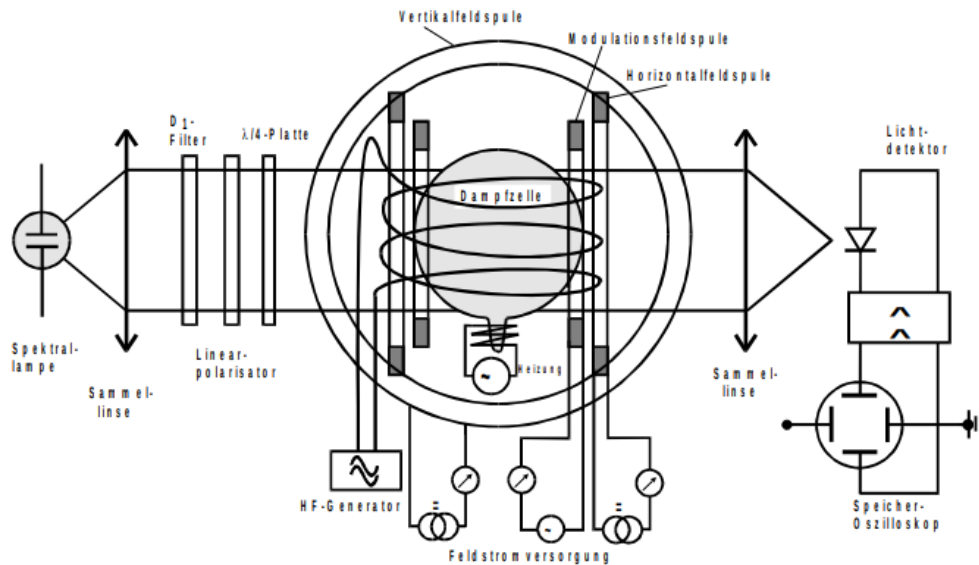


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Messapparatur [3]

gezeigt aus einer Rubidium-Spektrallampe, einem D1-Filter, der nur die Wellenlänge $\lambda = 794,9 \text{ nm}$ durchlässt. Daraufhin wird das Licht mithilfe eines Linearpolarisators und einer $\frac{\lambda}{4}$ Platte polarisiert. Das polarisierte Licht trifft auf eine Dampfzelle, welche sich innerhalb von drei Helmholtzspulen befindet. Zwei davon erzeugen horizontale Magnetfelder. Am Ende fällt das Licht auf einen Detektor. Zwischen der Spektrallampe und dem Detektor stehen zwei Sammellinsen.

3.2 Durchführung

Am Anfang werden die optischen Elemente eingesetzt. Dafür werden diese so justiert, dass der Ausschlag auf dem Galvanometer maximal wird. Danach wird der Tisch in Nord-Süd Richtung ausgerichtet, um eine Komponente des Erdmagnetfeldes zu kompensieren. Der Versuch wird mit einer schwarzen Decke abgedeckt, da dieser sehr lichtempfindlich ist. Das Oszilloskop wird auf den X-Y-Modus gestellt. Die Vertikale Helmholtzspule wird so lange variiert, bis der Peak so schmal wie möglich wird, um eine weitere Komponente des Erdmagnetfeldes zu kompensieren. Ein Sinusgenerator wird anschließend an das Kontrollgerät angeschlossen und die Frequenz wird von 100 kHz bis 1 MHz in 100 kHz Schritten erhöht. Die Resonanzen beider Isotope werden dabei für jede Frequenz gemessen. Die Horizontale Spule wird dann eingestellt, wenn die Peaks der Isotope nicht im angezeigten Bereich liegen.

4 Auswertung

In diesem Abschnitt werden die aufgenommenen Messdaten in Grafiken sowie Tabellen dargestellt und ausgewertet. Grafiken sowie dazugehörige Rechnungen sind mit Python [6] erstellt bzw. berechnet worden.

4.1 Landé-Faktoren und Kernspins

In Tabelle (1) sind die aufgenommenen Frequenzen sowie Ströme der Horizontalspule und der Sweepspule für die jeweiligen Transparenzminima eingetragen.

Tabelle 1: RF-Frequenzen und Ströme der Horizontalspule und Sweepspule.

ν_{RF}/kHz	$I_{H,87}/\text{A}$	$I_{S,87}/\text{A}$	$I_{H,85}/\text{A}$	$I_{S,85}/\text{A}$
100.0	0.0	0.384	0.0	0.504
200.0	0.0	0.656	0.0	0.893
300.0	0.012	0.467	0.012	0.896
400.0	0.035	0.382	0.035	0.899
500.0	0.076	0.210	0.076	0.823
600.0	0.102	0.134	0.102	0.792
700.0	0.124	0.145	0.168	0.834
800.0	0.128	0.192	0.189	0.495
900.0	0.146	0.220	0.197	0.401
1000.0	0.169	0.200	0.231	0.262

Aus den oben stehenden Strömen wird mit Gleichung (6) das Magnetfeld berechnet:

$$B = \mu_0 \frac{8 \cdot IN}{\sqrt{125} \cdot R} \quad (6)$$

Dabei ist I der Spulenstrom und μ_0 die magnetische Feldkonstante. Für die Horizontalspule gilt $N = 154$ und $R = 15,69 \text{ cm}$, für die Sweepspule gilt $N = 11$ und $R = 16,39 \text{ cm}$. Eine lineare Regression des Magnetfeldes der Form $B = a\nu + b$ gegen die eingestellte Frequenz liefert

$$B_{87} = (0,156 \pm 0,007) \frac{\mu\text{T}}{\text{kHz}} \cdot \nu + (1 \pm 4) \mu\text{T}$$

$$B_{85} = (0,225 \pm 0,016) \frac{\mu\text{T}}{\text{kHz}} \cdot \nu + (6 \pm 10) \mu\text{T}$$

Die Daten mit den zugehörigen oben genannten Geraden sind in Abbildung 5 zu finden:

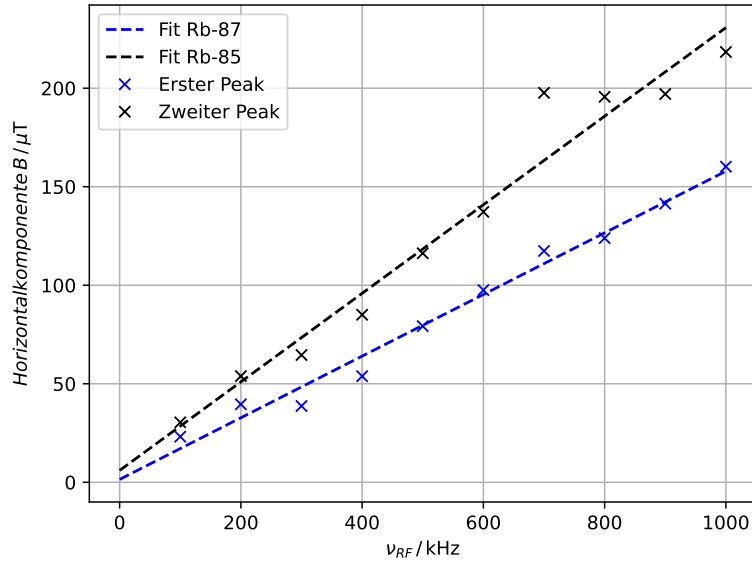


Abbildung 5: Horizontales Magnetfeld gegen die Frequenz.

Um die Landé-Faktoren zu berechnen wird die Gleichung (??) wie folgt umgestellt:

$$\begin{aligned}
 h\nu_0 &= g_F \mu_B B_0 \\
 \Leftrightarrow \nu_0 &= \frac{g_F \mu_B B_0}{h} \\
 \Rightarrow a &= \frac{h}{g_F \mu_B} \\
 \Leftrightarrow g_F &= \frac{h}{a \mu_B}
 \end{aligned}$$

Mit h als Planckschem Wirkungsquantum und a als Steigung der Geraden aus Abbildung (5). Damit ergibt sich für die Landé-Faktoren:

$$g_{F,85} = 0.457 \pm 0.021$$

$$g_{F,87} = 0.318 \pm 0.023$$

Mit Gleichung ?? wird g_J berechnet. Mit $S = \frac{1}{2}$, $L = 0$ und $J = \frac{1}{2}$ folgt $g_J = 2.0023$. Für die Kernspins gilt

$$I = \frac{g_J}{2g_F - \frac{1}{2}} \quad (7)$$

Damit folgen

$$I_{87} = 1.69 \pm 0.10$$

$$I_{85} = 2.65 \pm 0.23$$

4.2 Isotopenverhältnis

In Abbildung (6) ist das Signalbild für $\nu = 100 \text{ kHz}$ dargestellt. Aus dem Amplitudenverhältnis der beiden beobachteten Transparenzminima wird das Isotopenverhältnis der untersuchten Probe bestimmt. Aus diesem Bild werden die Amplituden mit Hilfe von

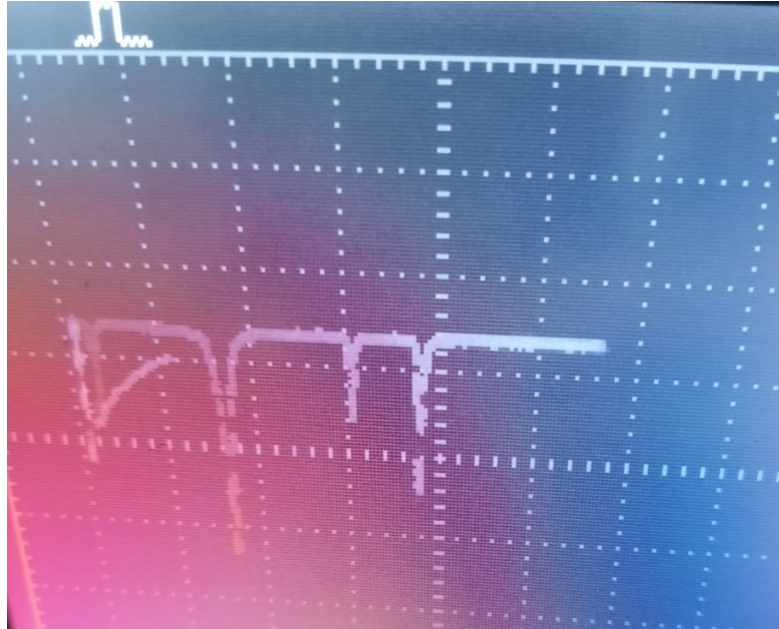


Abbildung 6: Oszilloskopbild bei 100 kHz

Paint [5] abgelesen, es ergibt sich für die jeweilige Amplitude:

$$\begin{aligned}A_{87} &= 77 \text{ px} \\ A_{85} &= 175 \text{ px}\end{aligned}$$

Daraus ergibt sich für die Isotope ein Verhältnis von $^{87}\text{Rb} \approx 31\%$ und $^{85}\text{Rb} \approx 69\%$.

4.3 Quadratischer Zeeman-Effekt

Als letztes wird der Einfluss des quadratischen Zeeman-Effekte ausgewertet. Nach Gleichung (??) für die lineare Näherung und dem quadratischen Teil von Gleichung (??) für die quadratische Näherung folgt für die Seemannenergie jeweils:

$$\begin{aligned}U_{\text{HF},87,\text{linear}} &= (6,79 \pm 0,31) \cdot 10^{-28} \text{ J} \\ U_{\text{HF},85,\text{linear}} &= (6,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-28} \text{ J} \\ U_{\text{HF},87,\text{quad}} &= (2,29 \pm 0,21) \cdot 10^{-31} \text{ J} \\ U_{\text{HF},85,\text{quad}} &= (9,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-32} \text{ J}\end{aligned}$$

5 Diskussion

Die in Abschnitt (4.1) berechneten Spins ergaben sich zu:

$$I_{87} = 1.69 \pm 0.10$$

$$I_{85} = 2.65 \pm 0.23$$

Im Vergleich dazu sind die Literaturwerte [4] gegeben durch:

$$I_{87} = 1.5$$

$$I_{85} = 2.5$$

Dies entspricht einer Abweichung für ^{87}Rb von ungefähr 12.7% und für ^{85}Rb von ungefähr 6%. Dieses Ergebnis bestätigt die dem Experiment zu Grunde liegende Theorie relativ gut. Die Abweichungen lassen sich größtenteils dadurch erklären, dass das Ablesen oft nur ungenau möglich war und so einige Messwerte, gerade bei höheren Frequenzen, schwer festzustellen waren.

Das Isotopenverhältnis wurde zu $^{87}\text{Rb} \approx 31\%$ und $^{85}\text{Rb} \approx 69\%$ bestimmt. Die Literaturwerte [4] sind gegeben durch $^{87}\text{Rb} = 27.83\%$ und $^{85}\text{Rb} = 72.17\%$. Dies entspricht einer Abweichung für ^{87}Rb von ungefähr 11.3% und für ^{85}Rb von ungefähr 4.3%. Damit sind in etwa die selben Abweichungen wie bei den Kernspins vorhanden. In diesem Teil war es jedoch noch schwieriger genau vom Oszilloskopbild abzulesen, die kleinen Abweichungen sprechen daher für eine gute Messung und ein gelungenes Experiment.

Wie bei den verwendeten magnetischen Feldstärken zu erwarten spielt der quadratische Zeeman-Effekt eine eher untergeordnete Rolle. Die Energien für diesen sind drei Größenordnungen kleiner als vom linearen Zeeman-Effekt.

Literatur

- [1] Chemgapedia. *Laser*. URL: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/spektroskopie/spektrometer/laser.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/spektroskopie/spektrometer/laser/laser3.vscml.html> (besucht am 15.12.2021).
- [2] Chemgapedia. *Laser*. URL: <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/spektroskopie/spektrometer/laser.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/spektroskopie/spektrometer/laser/laser3.vscml.html> (besucht am 15.12.2021).
- [3] TU Dortmund. *Anleitung zu V21 - Optisches Pumpen*. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1732524/mod_resource/content/2/V21.pdf (besucht am 01.12.2021).
- [4] Internetchemie.Info. *Rubidium-Isotope*. URL: <https://www.internetchemie.info/chemische-elemente/rubidium-isotope.php> (besucht am 01.12.2021).
- [5] Microsoft. *Paint*. URL: <https://www.microsoft.com/de-de/p/paint/9pcfs5b6t72h#activetab=pivot:overviewtab> (besucht am 01.12.2021).

[6] Python. URL: <https://www.python.org> (besucht am 01.12.2021).