
Experimentalphysik I:
Licht-Materie-Wechselwirkung

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science
der Physik

Aufbau eines automatisierten Magnetpositionierungssystems zur präzisen Ausrichtung auf die Quantisierungsachse von Farbzentren

Autor: Ricky-Joe Plate (platericky@aol.de)
Helmholtzstraße 11 in 34127 Kassel

Matrikelnummer: 333 005 86

Erstgutachter: Prof. Dr. Kilian Talo Theodor Singer
Zweitgutachter: Prof. Dr. Martin E. Garcia

Ort: Kassel
Abgabe: 11.12.2020

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken (dazu zählen auch Internetquellen) entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum: _____

Unterschrift: _____

Zusammenfassung

Gitterstrukturen, wie beispielsweise ein Diamant, können Unreinheiten aufweisen. Wenn die Unreinheiten im sichtbaren Licht emittieren, werden diese als Farbzentren bezeichnet. Dabei kann bei einer hohen Konzentration an solchen Unreinheiten im Gitter diese dem Objekt eine andere Farbe verleihen. So führen beispielsweise Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (kurz NV-Zentren) im Diamant zu einer gelben Färbung. NV-Zentren bestehen aus einem Stickstoffatom und einer Fehlstelle und können über Konfokalmikroskopie detektiert werden. Zusätzlich zu der Detektion der NV-Zentren kann mittels Mikrowellen Spektroskopie betrieben werden. Dabei lassen sich mittels eines Magnetfeldes die Energieniveaus beeinflussen. Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Bau eines Magnetpositionierungssystems, welches eine präzise Ausrichtung des Magnetfeldes ermöglicht. So kann die Ausrichtung der NV-Achse im Diamanten bestimmt und gezielt angefahren werden.

Abstract

Lattice structures, such as a diamond, can have impurities. When the impurities emit in visible light, these are called color centers. A high concentration of such impurities in the grid can give the object a different color. For example, nitrogen vacancy centers (NV centers for short) in diamond lead to a yellow color. NV centers consist of a nitrogen atom and a defect and can be detected using confocal microscopes. In addition to the detection of the NV centers, microwave spectroscopy can be carried out. The energy levels can be influenced by means of a magnetic field. This bachelor thesis deals with the construction of a magnet positioning system, which enables a precise alignment of the magnetic field. The alignment of the NV axis in the diamond can thus be determined and approached in a targeted manner.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	7
2.1	Farbzentren in Diamanten	7
2.1.1	NV-Zentren	8
2.2	Absorptionsaufnahme eines Diamanten	9
2.2.1	Detektierung einer Fehlstelle	9
2.3	ODMR	11
2.3.1	Aufnahme des Spektrums	11
2.3.2	Manipulation des NV-Zentrums mittels Magnetfeld	12
2.3.3	Auslesen des Elektronenspins	14
2.3.4	Rabi-Oszillationen	15
2.4	Blochkugel und Quantum Bits	16
2.5	Kernspin	18
2.5.1	Benutzung des NV-Zentrums als Qubit	19
2.5.2	ODMR-Spektren unter Berücksichtigung der Kernaufspaltung	19
3	Versuchsaufbau	21
3.1	Vorhandener Versuchsaufbau	21
3.2	Erweiterung des Versuchsaufbaus	23
3.2.1	Hängender Aufbau	23
3.2.2	Seitlicher Aufbau	24
4	Magnetpositionierungssystem	27
4.1	Aufbau des Magnetpositionierungssystems	27
4.2	Ausrichtung des Magneten	29
4.3	Steuerungsprogramm	30
4.3.1	Hauptfenster	30
4.3.2	Positionsfenster	32
4.3.3	Einstellungsfenster	33
4.3.4	Grenzfenster	34
4.4	Magnetfeldbestimmung	35
5	Detektion eines NV-Zentrums	39
5.1	Detektion einer Fehlstelle durch Konfokalmikroskopie	39
5.2	Aufnahme eines NV-Zentrums durch ODMR	40
5.3	ODMR-Spektrum zu verschiedenen Magnetfeldstärken	41
6	Zusammenfassung und Ausblick	45
6.1	Konstruktion des Magnetpositionierungssystems	45
6.2	Vergleich der äußeren Magnetfelder	45
6.3	Ausblick	45
7	Anhang	49
7.1	ODMR-Spektren zur Magnetfeldaufspaltung	49

1 Einleitung

Die Physik des 20. Jahrhundert beschäftigt sich mit zwei grundlegend neuen Theorien, zum einen der Relativitätstheorie und zum anderen der Quantenmechanik. Die Relativitätstheorie beschäftigt sich dabei mit der Raumzeit, sowie der Gravitation und die Quantenmechanik mit den kleinsten Objekten des Universums. Im Vergleich zu der Relativitätstheorie, welche zu dieser Zeit experimentell nicht nachweisbar war, wurde die Quantenmechanik genutzt, um bereits bestehende Experimente zu beschreiben, wie beispielsweise die Fraunhoferlinien im Spektrum der Sonne oder den Photoeffekt. Ende des 19. Jahrhunderts und Anfang des 20. Jahrhunderts untersuchte Max Planck das Frequenzspektrum von Schwarzkörpern und beobachtete einen Zusammenhang, welcher später unter dem Planckschen Strahlungsgesetz bekannt wird. Das Gesetz enthielt jedoch einen Faktor, welcher nach Planck ersetzt werden müsse, da dieser nur die diskreten Werte zulässt[1]. Die diskreten Werte sind dabei immer ein Vielfaches der Frequenz multipliziert mit einer Konstanten. Diese Konstante ist heute als Planck'sches Wirkungsquantum h bekannt. Erst als Albert Einstein die Quantisierung als Erklärung für den Photoelektrischen Effekt genutzt hat und Niels Bohr damit die Stabilität des Atoms erklären konnte, war die Quantentheorie, oft auch als 'old quantum theory' bezeichnet, geboren. Die Quantenmechanik, welche aus der Quantentheorie entstand, entwickelte sich in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts und wurde durch Physiker wie Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger begründet. Die Theorie war zu dieser Zeit stark diskutiert, da sie im Gegensatz zu der damals bereits verstandenen Mechanik steht. So kam es, dass renommierte Physiker, wie beispielsweise Albert Einstein, bis zu ihrem Tod nicht an die Quantenmechanik geglaubt haben.

Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der Alte nicht würfelt.

Albert Einstein (1926)[2]

In der derzeitigen physikalischen Forschung ist die Quantenmechanik allgegenwärtig. Das größte Ziel, neben der Forschung, ist der Nutzen der quantenmechanischen Eigenschaften. Vielversprechende Anwendungsgebiete liefern dabei beispielsweise *Halbleiter*, *quantum metrology*, *quantum networks*, *quantum teleportation*, *quantum sensing* oder *quantum computing*.

Experimente für die verschiedenen Nutzungsfelder bieten unter anderem Ionen in Ionenfallen oder Stickstoff-Fehlzentren im Diamanten, sogenannten NV-Zentren. Diese wurden, obwohl das NV-Zentrum bereits vorher bekannt war, erst als Einzelnes Mitte der 90er Jahre detektiert[5]. Das NV-Zentrum ist dabei vielversprechend, sowohl für *quantum sensing* als auch *quantum computing* und bildet daher einen wichtigen Forschungsweig. Durch *Optically detected magnetic resonance* (kurz ODMR) Spektroskopie kann die Aufspaltung zwischen Spinzuständen präzise gemessen werden. Da die $m_s = \pm 1$ Spinzustände durch ein Magnetfeld beeinflusst werden, kann damit die magnetische Flussdichte sehr präzise bestimmt werden. In diesem Fall fungiert das NV-Zentrum als ein Sensor. Die zweite Möglichkeit bildet das *quantum computing*, in welchen NV-Zentren als Quantum Bits (kurz Qubits) betrachten werden können.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Funktion des NV- Zentrums als Magnetfeldsensor. Ziel war es, ein Magnetpositionierungssystem zu konstruieren, welches eine Magnetfeldachse mittels eines Permanentmagneten erzeugt. Die Magnetfeldachse kann dann mittels zweier Motoren beliebig rotiert werden. Dadurch ist es möglich, die Magnetfeldachse parallel zur NV-Achse auszurichten. Zur Überprüfung der Parallelität wird das Magnetfeld bei bestimmten Abständen zwischen Probe und Magneten auf zwei verschiedene Arten bestimmt.

2 Grundlagen

Hauptziel dieser Bachelorarbeit war der Bau eines Magnetpositionierungssystems, welches eine beliebige Drehung der Magnetfeldachse ermöglichen soll. Die Magnetfeldachse soll damit parallel zur NV-Achse ausgerichtet werden können. NV steht hierbei für eine Stickstoff-Fehlstelle (engl. *Nitrogen-Vacancy*) in einem atomaren Gitter. Um zu verstehen und zu klären, was in diesem Experiment passiert, müssen zunächst einige Themen erläutert werden. Dies wird in den folgenden Grundlagen passieren.

2.1 Farbzentren in Diamanten

Um zu verstehen was ein NV-Zentrum in einem Diamanten ist, muss zunächst geklärt werden, was Verunreinigungen und Fehlstellen in einem solchen sind. Der Diamant ist ein atomares Gitter, was bedeutet, dass dieser eine feste Anordnung von Atomen besitzt, die sich periodisch wiederholen. In Abbildung 1a und 1b ist eine solche feste Anordnung zu sehen.

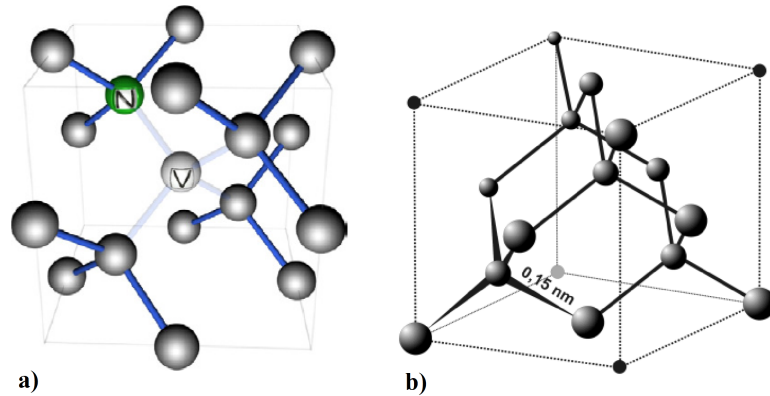


Abbildung 1: a) NV-Zentrum als Verunreinigung in einem Diamantengitter. Die grauen Kugeln stehen dabei für Kohlenstoffatome, die grüne Kugel, mit einem N gekennzeichnet, für ein Stickstoffatom und die weiße Kugel mit der Aufschrift V für eine Fehlstelle. b) zeigt eine sich periodisch wiederholende Diamantenstruktur ohne NV-Zentrum.[3]

Bei dem Diamant handelt es sich um ein *fcc-Gitter*, wobei *fcc* für kubisch flächenzentriert (engl. *face centered cubic*) steht (Abbildung 1b)[4]. Der Grund, warum für diesen Versuch ein Diamant genutzt wird, liegt in verschiedenen Eigenschaften, die diese Struktur aufweist. So bildet der Diamant mit einer Mohshärte von 10 das härteste in der Natur vorkommende Material[22]. Er besitzt dabei kovalente Bindungen, welche ihn robust gegenüber Änderungen der äußeren Bedingungen machen. So ist es beispielsweise aufwendig, Fehlstellen oder Fremdatome im Gitter zu erzeugen, jedoch sind diese, sobald sie existieren, selbst bei Raumtemperaturen sehr stabil. Die jedoch wichtigsten Eigenschaften des Gitters sind die große Bandlücke von ≈ 5.48 eV und ein Gesamtkernspin von $I = 0$. Die große Bandlücke hat den Vorteil, dass die Energieniveaus des Farbzentrums frei angeregt werden können, ohne den Kohlenstoff zu beeinflussen. Ebenfalls kommt es durch einen Kernspin von Null dazu, dass der Kernspin der Kohlenstoffatome nicht mit dem Kernspin des Farbzentrums wechselwirkt.

Ein Farbzentrum muss nicht unbedingt aus Stickstoff bestehen. Es existieren mittlerweile über 500 bekannte Punktdefekte wie Si, Ta, W, Ni, etc.. Jedoch wird im Weiteren nur das NV-Zentrum betrachtet.

2.1.1 NV-Zentren

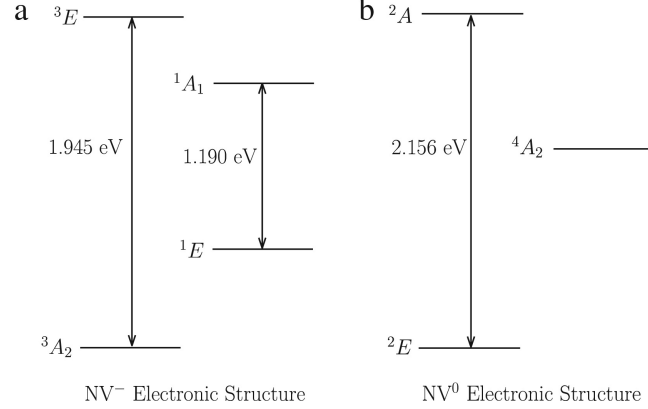


Abbildung 2: Energieschema eines NV^- -Zentrums (a) und eines NV^0 -Zentrums (b). In a) steht 3E für den ersten angeregten Zustand, 3A_2 für den Grundzustand sowie 1A_1 und 1E für die beiden Dunkelzustände. Die angegebenen Energien der Übergänge bilden in einem Intensitätsspektrum die im späteren Verlauf erklärten Zero-Phonon-Lines. In b) steht 2A für den ersten angeregten Zustand, 2E für den Grundzustand und 4A_2 für den Dunkelzustand. Der gezeigte Übergang steht ebenfalls für die Zero-Phonon-Line.[5]

Je nach Ladung können NV-Zentren weiter unterschieden werden. So gibt es NV^0 - und NV^- -Zentren, die sich durch ihre Anzahl an Elektronen unterscheiden. Das NV^- -Zentrum besitzt dabei ein Elektron mehr als das NV^0 -Zentrum, wobei das zusätzliche Elektron aus der unmittelbaren Umgebung von einem Kohlenstoffatom stammt. Weitere Unterschiede bestehen zunächst in ihren Energieniveaus. Dadurch können diese gut durch ihre *Zero-Phonon-Lines* unterschieden werden. Die Zero-Phonon-Lines sind die Peaks in einem Wellenlängenspektrum, welche vom System absorbiert werden (Abbildung 2). Das bedeutet, dass die Photonen dieser oder kleinerer Wellenlängen das NV-Zentrum anregen können. Da die Energieniveaus des NV^0 - und des NV^- -Zentrums unterschiedlich sind, unterscheiden sich deren Spektren. Die *Zero – Phonon – Line* vom NV^0 -Zentrum liegt bei ungefähr 575 nm (≈ 2.156 eV) und die des NV^- -Zentrums bei ungefähr 637 nm (≈ 1.945 eV). Zusätzlich zu diesem Peak besitzt das NV^- -Zentrum eine weitere Zero-Phonon-Line im infraroten Bereich bei ungefähr 1042 nm (≈ 1.190 eV). Das Energieschema der für diesen Versuch wichtigen Niveaus ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Zero-Phonon-Lines stammen hierbei aus den sichtbaren Übergängen zwischen dem ersten angeregten Niveau 3E zum Grundzustand 3A_2 , sowie zwischen den sogenannten Dunkelzuständen 1A_1 und 1E für das NV^- -Zentrum und zwischen 2A und 2E für das NV^0 -Zentrum. Bei größeren Wellenlängen existieren ebenfalls erhöhte Intensitäten. Ursache hierfür sind die Schwingungen des Diamantgitters, welche bereits bei Raumtemperaturen angeregt werden.

Auf Grund seiner Eigenschaften wird im Nachfolgenden nur noch das NV^- -Zentrum betrachtet und somit vereinfacht als NV-Zentrum bezeichnet.

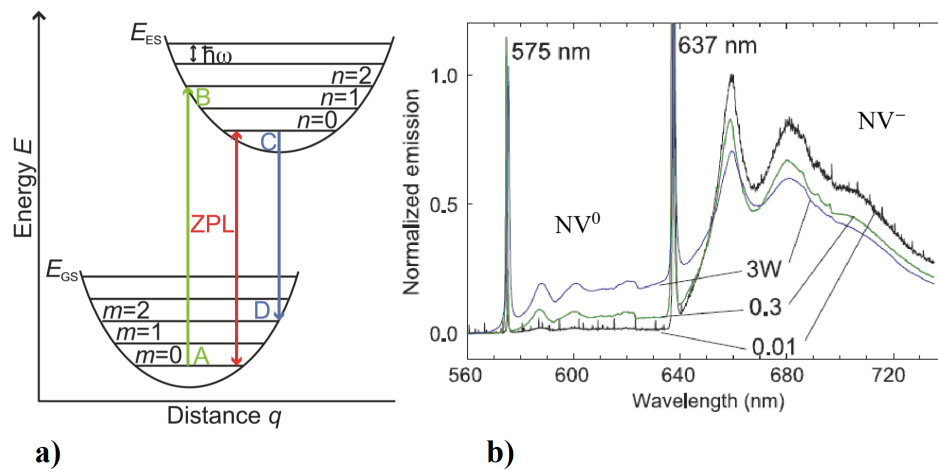


Abbildung 3: In a) sind die Zero-Phonon-Lines-Übergänge gut zu erkennen. Diese sind in der Abbildung durch die roten Pfeile gekennzeichnet und bilden den Übergang zwischen dem niedrigsten vibronischen Zustand des Grundniveaus und dem niedrigsten vibronischen Zustand des ersten angeregten Niveaus. Der grüne bzw. blaue Pfeil zeigt dabei den wahrscheinlichsten Übergang durch Absorption bzw. Emission [4]. In b) ist die Intensität der Emission zu verschiedenen Wellenlängen aufgetragen. Die Daten wurden über mehrere verschiedenen NV-Zentren bei 10 K gemittelt. Im Diagramm sind dabei die Zero-Phonon-Lines des NV^- - und des NV^0 -Zentrums als intensitätsstarke Peaks zu erkennen. Seitlich von den Peaks finden sich weitere Intensitätsausschläge, die durch Vibrationen im Diamanten erklärbar sind[5].

2.2 Absorptionsaufnahme eines Diamanten

Um im Weiteren mit Methoden wie der optischen Detektion magnetischer Resonanz (genauer: Kapitel 2.3) zu arbeiten, muss zunächst eine solche Defektstelle im Diamanten gefunden werden. Dazu wird ein *Konfokalmikroskop* genutzt. Auf den Aufbau wird in Kapitel 3.1 näher eingegangen. Ein Konfokalmikroskop funktioniert ähnlich wie ein Lichtmikroskop. Der wesentliche Unterschied zwischen Lichtmikroskop und Konfokalmikroskop ist, dass bei einem Konfokalmikroskop nur Photonen einer bestimmten Wellenlänge und nicht das gesamte sichtbare Spektrum detektiert wird[6]. Daher wird der Diamant nicht als Ganzes betrachtet, sondern langsam von Punkt zu Punkt, mittels Laser, abgerastert. Dabei wird dann mit einer *avalanche Photodiode* (APD) die Intensität aufgenommen. Hierbei entsteht ein zweidimensionales Intensitätsprofil einer definierten Stelle (*Region of Interest* (kurz *ROI*)). Vorteil dieser Methode ist eine erhöhte Auflösung, Nachteil jedoch ist eine längere Aufnahmezeit.

2.2.1 Detektierung einer Fehlstelle

Um eine Absorption zu detektieren, und somit eine Fehlstelle zu finden, muss das NV-Zentrum zunächst vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand angehoben werden. Dazu wird eine Lichtquelle benötigt, die Wellenlängen unterhalb der Zero-Phonon-Line emittiert, da sonst nach der Stokes-Verschiebung eine Absorption durch das NV-Zentrum nicht möglich ist (Abbildung 3a grüner Pfeil). Die hierbei verwendete Lichtquelle bildet ein Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$.

welcher kontinuierlich auf das NV-Zentrum gerichtet wird. In den nun angeregten vibronischen Zustand im ersten angeregten elektronischen Zustand relaxiert das Elektron in den vibronischen Grundzustand strahlungsfrei. Danach wechselt das Elektron nach dem Condon-Prinzip das Energieniveau unter Emission eines Photons von dem ersten angeregten Zustand in den Grundzustand[7]. Das dabei emittierte Photon kann dann mit der APD detektiert werden.

Durch das Abrastern des Diamanten entsteht ein Intensitätsmuster. Je dunkler der Punkt ist, umso weniger Photonen werden von der APD detektiert. Ebenso gilt, umso heller ein Punkt ist, desto mehr Photonen werden detektiert. Die Anzahl der detektierten Photonen hängt dabei von unterschiedlichen Faktoren ab.

Zum einen spielt die Intensität des Lasers eine Rolle, zum anderen die Lichtverhältnisse im Raum. Zusätzlich bilden die Verschmutzung der jeweiligen Stelle und die Phononenseitenbänder eine Ungenauigkeit. Das erste Problem kann durch optische Geräte gesteuert werden. Die Lichtverhältnisse im Raum können ebenfalls minimiert, jedoch nicht vernachlässigt werden. Der durch den Schmutz entstehende Photonenanteil kann durch *Bleaching* minimiert werden. Hierbei wird der Laserstrahl auf eine bestimmte Stelle auf dem zu scannenden Bereich fokussiert bis der Schmutz zum großen Teil nicht mehr im betrachteten Wellenlängenbereich emittiert. Dieser Prozess ist jedoch sehr zeitaufwendig, weshalb er nur für kleine Stellen genutzt wird. Das zweite Problem ist nicht vermeidbar, da die Phononenseitenbänder Teil der Struktur sind. Wie der Name bereits andeutet, besteht die Ursache der Bänder aus den Phononen. Wie in Abbildung 3b bereits gezeigt, besteht das aufgenommene Wellenlängenspektrum aus mehr, als nur der Zero-Phonon-Line. Diese bildet lediglich den ersten Peak im Spektrum.

2.3 ODMR

Um eine Fehlstelle weiter zu untersuchen und zu schauen, ob es sich dabei beispielsweise um ein NV-Zentrum handelt, wird die ODMR-Spektroskopie (*Optical Detected Magnetic Resonance Spectroscopy*) angewendet[5]. Dabei werden mittels eines *Arbitrary Waveform Generators* (AWG) Mikrowellen im GHz-Bereich erzeugt, auf das NV-Zentrum gerichtet und mittels der APD dessen Intensität gemessen. Die Intensität wird dann gegen die Frequenz aufgetragen.

2.3.1 Aufnahme des Spektrums

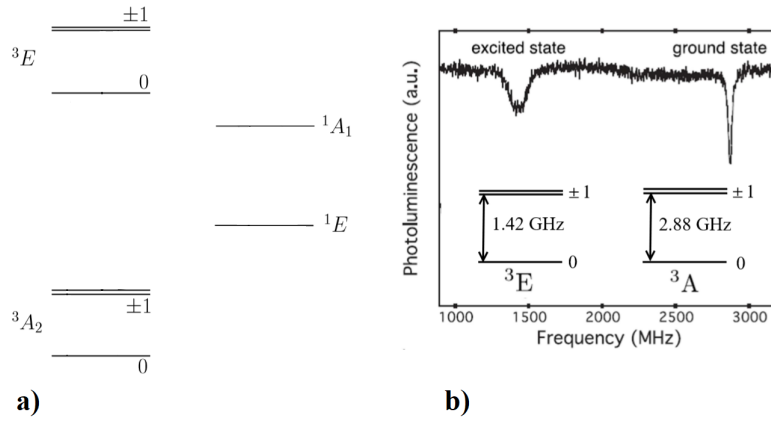


Abbildung 4: a) Energieschema eines NV-Zentrums unter Betrachtung der Magnetquantenzahl m_s . Es existieren dabei zwei Singulett-Zustände und zwei Triplett-Zustände, welche durch den Spin in drei verschiedene Niveaus unterteilt werden können. b) ODMR-Spektrum eines NV-Zentrums. Hierbei wurde zur eingestrahlichten Frequenz die gemessene Intensität aufgetragen. Zu sehen sind zwei Dips, welche durch die Triplett-Zustände des Grund- sowie des ersten angeregten Zustandes entstehen.[5]

In Abbildung 2 ist das Energieniveauschema nur sehr oberflächlich dargestellt, da der Spin vernachlässigt wurde. Deshalb sind in Abbildung 4a zusätzlich die Energieniveaus der Singulett- und Triplett-Zustände verdeutlicht. Um das NV-Zentrum und dessen Elektronenspin zu beeinflussen, welches elementar für einen möglichen Einsatz als Quantenbit ist, muss eine Methode entwickelt werden, um diese vertrauenswürdig auslesen zu können. Hierbei wird auf die Methode des ODMR zurückgegriffen. In Abbildung 4a ist zu erkennen, dass durch Aufspaltung die Triplett-Zustände durch die Magnetquantenzahl in 3 weitere Zustände beschrieben werden können ($m_s = 0, +1, -1$). Das NV-Zentrum besitzt zwei ungepaarte Elektronen, bei denen sich der gesamtintrinsic Drehimpuls additiv zusammensetzt, sodass drei mögliche magnetische Quantenzahlen existieren. Zum Vergleich existieren bei einem NV^0 -Zentrum nur zwei mögliche Zustände ($m_s = \pm \frac{1}{2}$), da lediglich ein ungepaartes Elektron vorliegt. Der intrinsic Drehimpuls, auch Spin S genannt, hängt dabei nicht nur von der Ladung q und Masse m ab, sondern ebenfalls vom magnetischen Dipolmoment μ_s des NV-Zentrums:

$$\mu_s = g \frac{q}{2m} S. \quad (1)$$

Dabei steht g für das gyromagnetische Verhältnis (für Elektronen gilt $g \approx 2$ [11]). Daraus folgt eine Entartung der Energieniveaus ohne, dass ein äußeres Magnetfeld angelegt worden ist. Diese sogenannte Null-Feld-Aufspaltung (B_0) kann über die von Zeeman hergeleitete Gleichung ausgedrückt werden:

$$\Delta E = \mu_B g S B_0 = h f \quad \Rightarrow \quad B_0 = \frac{h f}{\mu_B g S}. \quad (2)$$

μ_B steht dabei für das Bohr'sche Magneton, h für das Plank'sche Wirkungsquantum und f für die Resonanzfrequenz. Aus diesen Werten ergibt sich für das Null-Magnetfeld des NV-Zentrums $B_0 \approx 1025.27 \text{ G}$ [9].

Werden Mikrowellen kontinuierlich auf das NV-Zentrum eingestrahlt, so ist ein Übergang bei der Resonanzfrequenz zwischen den Magnetquantenzahlen $m_s = 0$ in $m_s = 1$ möglich. In diesem Fall wird ein Rückgang im Mikrowellenspektrum bei den jeweiligen Frequenzen erwartet (2.3.3), welches in Abbildung 4b zu erkennen ist, bei welcher die Intensität gegen die Mikrowellen aufgetragen wurde. Zu erkennen sind in dem ODMR-Spektrum zwei Rückgänge der Intensität, bei 2.87 GHz für den Grundzustand und bei 1.42 GHz für den ersten angeregten Zustand.

2.3.2 Manipulation des NV-Zentrums mittels Magnetfeld

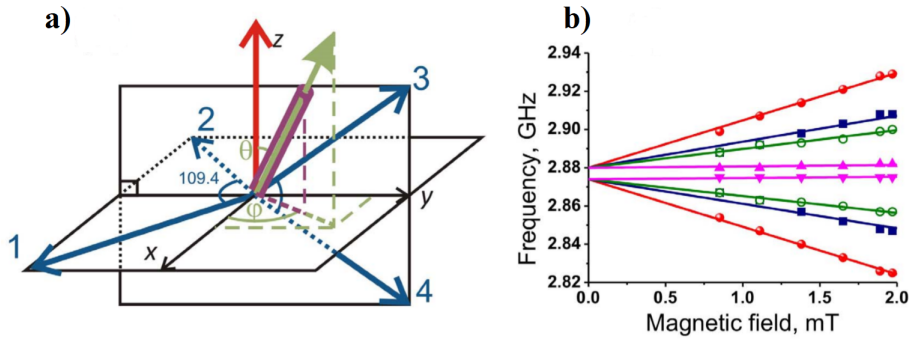


Abbildung 5: a) Der Diamant ist periodisch aufgebaut und besitzt daher immer vier Möglichkeiten für einen Bindungswinkel (hier markiert als Achse 1, 2, 3 und 4). Das Koordinatensystem x , y und z wurde so ausgelegt, dass zwei der Achsen in der x - y -Ebene liegen, während die z -Achse zu dieser Ebene senkrecht steht. In einer weiteren Ebene sind die beiden anderen Ausrichtungsmöglichkeiten gezeigt. Der grüne Pfeil ist willkürlich gewählt und symbolisiert die Magnetfeldachse. b) Erwarteter Zusammenhang zwischen der Frequenzverschiebung und der Stärke des zur NV-Achse gerichteten Magnetfeldes.[10]

Bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes kommt es zu einer Aufhebung der Entartung des $m_s \pm 1$ -Zustands[9]. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass nur das gesamte Magnetfeld unter einem Spezialfall betrachtet werden kann, da hauptsächlich nur die Komponente des Magnetfeldes parallel zur Achse des NV-Zentrums dieses beeinflusst. In dem Fall, dass das externe Magnetfeld keine Komponente in Richtung der Achse des NV-Zentrums besitzt, ist nur eine kleine Veränderung in Hinblick auf das ODMR-Spektrum zu erkennen (Abbildung 5). Das Gesamtmagnetfeld für die Aufspaltung setzt sich additiv zusammen:

$$B_{\text{ges}} = B_0 + B_{||}. \quad (3)$$

In einem aufgenommenen Frequenzspektrum existieren daher zwei Dips, die je nach Stärke des Magnetfeldes in Ausrichtung zur NV-Achse auseinander oder zusammen laufen (Abbildung 5b). Im Hamilton Operator lässt sich das wie folgt ausdrücken[10]:

$$\hat{H} = \mu_B g \vec{B} \cdot \hat{\vec{S}} + D \left[\hat{S}_z^2 - \frac{\hat{S}(\hat{S}+1)}{3} \right] + E (\hat{S}_x^2 - \hat{S}_y^2). \quad (4)$$

D stellt die axiale und E die nicht-axiale Null-Feld-Aufspaltung dar. Der erste Term im Hamilton Operator beschreibt die für dieses Kapitel relevante externe Magnetfeldaufspaltung. Der zweite und dritte Term behandelt dabei die Null-Feld-Aufspaltung. Wie in Abbildung 1 bereits gezeigt, ist der Diamant periodisch aufgebaut. Es existieren demnach nur vier Möglichkeiten für eine Bindung mit einem benachbarten Atom. Daraus folgt, dass ebenfalls nur vier Möglichkeiten existieren, in die ein NV-Zentrum ausgerichtet sein kann (Abbildung 5a, blauen Achsen). Die Winkel zwischen den Achsen betragen dabei immer $\alpha=109.4^\circ$. Um die Winkel im Nachhinein besser beschreiben zu können, werden die Achsen mit den dazugehörigen Winkeln θ_1 und θ_2 in die x-y-Ebene gelegt, sowie die anderen beiden Achsen mit den Winkeln θ_3 und θ_4 in eine zweite Ebene. Wird nun ein äußeres Magnetfeld angelegt, welches eine Magnetfeldachse mit bestimmtem Winkel zu den Ausrichtungsachsen des Diamanten hat, können diese mit den folgenden Gleichungen berechnet werden[10]:

$$\cos(\theta_1) = \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \varphi\right), \quad (5)$$

$$\cos(\theta_2) = -\sin\left(\frac{\alpha}{2} + \varphi\right), \quad (6)$$

$$\cos(\theta_3) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin(\theta) \varphi + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\theta), \quad (7)$$

$$\cos(\theta_4) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin(\theta) \varphi - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\theta). \quad (8)$$

θ und φ stehen dabei für den polaren und azimuthalen Winkel zwischen der Magnetfeldachse (Abbildung 5a, grüner Pfeil) und der z-Achse. Es gilt dabei, dass die Summe über alle $\cos(\theta_i)$ mit ($i=1,2,3,4$) Null ergeben muss.

Um daraus eine Gleichung für das Gesamtmagnetfeld B_{ges} und dessen Winkel zu den Ausrichtungsachsen zu erhalten wird Gleichung 4 mit den Eigenenergien $E_1 = E_0$, $E_2 = E_0 + \Omega_1$ und $E_3 = E_0 + \Omega_2$ betrachtet[10][26]. Es folgt für das Magnetfeld:

$$B = \frac{1}{\mu_B g} \sqrt{\frac{\Omega_{1,i}^2 + \Omega_{2,i}^2 - \Omega_{1,i}\Omega_{2,i} - D^2 - 3E^2}{3}}, \quad (9)$$

und für den Winkel:

$$\theta_i = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{7D^3 + 2P - 3D(\Omega_{1,i}^2 + \Omega_{2,i}^2 - \Omega_{1,i}\Omega_{2,i} + 9E^2)}{9D(\Omega_{1,i}^2 + \Omega_{2,i}^2 - \Omega_{1,i} - D^2 - 3E^3)} \right) \quad (10)$$

mit

$$P = (\Omega_{1,i} + \Omega_{2,i})[2(\Omega_{1,i}^2 + \Omega_{2,i}^2) - 5\Omega_{1,i}\Omega_{2,i} - 9E^2]. \quad (11)$$

$\Omega_{1,i}$ und $\Omega_{2,i}$ stehen dabei für die Frequenzen der Aufspaltung aufgrund des externen Magnetfelds. Für i können jeweils die vier Ausrichtungsmöglichkeiten im Diamanten eingesetzt werden. Da $E \ll D$ gilt, kann dies in den Gleichungen 9, 10 und 11 vernachlässigt werden.

Durch Verstellen des Winkels der Magnetfeldachse kann somit die Ausrichtung des Diamanten bestimmt werden, da bei der Bestimmung des Maximums der Zeemann-Aufspaltung die Magnetfeldachse parallel zur Ausrichtung des NV-Zentrums im Diamanten steht.

2.3.3 Auslesen des Elektronenspins

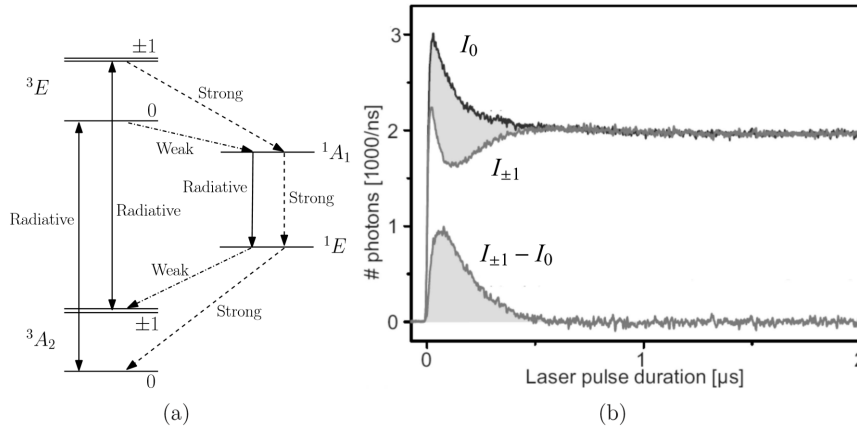


Abbildung 6: a) Energieschema des NV-Zentrums mit den jeweiligen Übergängen, sowie deren Wahrscheinlichkeiten. Die durchgezogenen Pfeile stehen für strahlende Übergänge, bei denen Photonen emittiert werden, die gestrichelten Pfeile für strahlungsfreie Übergänge, bei denen Phononen emittiert werden. b) zeigt die gemessenen Photonen nach einer bestimmten Zeit τ , die ein einzelnes NV-Zentrum nach einer Anregung durch einen Laser emittiert. Dieses Diagramm dient dazu, den Spin eines Elektrons des NV-Zentrums zu detektieren. I_0 steht dabei für eine Magnetquantenzahl von $m_s = 0$ und $I_{\pm 1}$ für $m_s = \pm 1$. [5]

Nach Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 wird deutlich, dass durch eine ODMR-Spektroskopie die Aufspaltung der Magnetquantenzahlen messbar ist. Jedoch wurde bisher nicht erläutert, wie der Rückgang der Intensität zu erklären ist. Dazu muss auf die Wahrscheinlichkeiten der Übergänge eingegangen werden. Hierfür müssen zunächst die bis jetzt kaum erwähnten Singulett-Zustände (auch Dunkelzustände) und deren Übergänge betrachtet werden. Die Wahrscheinlichkeit und Art der Übergänge ist in Abbildung 6a gezeigt. Wenn der Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm auf das zentrierte NV-Zentrum trifft, wird das Elektron in den ersten angeregten Zustand gehoben. Dieser Vorgang ist dabei immer spinerhaltend, was bedeutet, dass der Spin bei der Anregung des Laser nur von $m_{s,g} = 0$ in den $m_{s,e} = 0$ wechselt oder nur von $m_{s,g} = \pm 1$ in $m_{s,e} = \pm 1$. Ist das NV-Zentrum angeregt, existieren zwei Möglichkeiten, in den Grundzustand zurück zu relaxieren. Zum einen kann es unter Emission eines Photons spinerhaltend in den Grundzustand wechseln oder es relaxiert über die Singulett-Zustände und verändert dabei seinen Spin. Zusätzlich kann dadurch der Ursprungsspin des Elektrons bestimmt werden, da die Lebensdauer der Singulett-Zustände größer ist als die des angeregten Zustandes. Dazu muss die Intensität der Fluoreszenz gemessen und gegen die Zeit aufgetragen werden (Abbildung 6b).

2.3.4 Rabi-Oszillationen

In einem Zwei-Niveau-System kann durch resonante Anregung mittels elektromagnetischer Strahlung ein Übergang hervorgerufen werden. Die Besetzung der beiden Zustände beginnt dann, solange die Störung gegeben ist, zu oszillieren. Diese Oszillation zwischen den Besetzungszahlen wird als Rabi-Oszillation bezeichnet. Analog zur elektromagnetischen Welle kann auch ein oszillierendes magnetisches Feld eine Rabi-Oszillation verursachen. Dieses Magnetfeld wechselwirkt dann mit dem magnetischen Dipolmoment des Kernspins.

Die oszillierenden Besetzungswahrscheinlichkeiten $p_1(t)$ für den Grundzustand und $p_2(t)$ für den angeregten Zustand können dann wie folgt ausgedrückt werden[12][15].

$$p_g(t) = \cos^2\left(\frac{\Omega_{\text{Rabi}} t}{2}\right) \quad \text{bzw.} \quad p_e(t) = \sin^2\left(\frac{\Omega_{\text{Rabi}} t}{2}\right) \quad (12)$$

Wobei Ω_{Rabi} für die Rabi-Frequenz steht. Je nachdem, ob die Anregung durch eine elektromagnetische Welle (Gleichung 13) oder durch ein oszillierendes Magnetfeld (Gleichung 14) stattfindet, kann diese wie folgt definiert werden[13]:

$$\Omega_{\text{Rabi,E}} = -\frac{eE_0}{\hbar} \langle e|r|g \rangle, \quad (13)$$

$$\Omega_{\text{Rabi,B}} = \gamma B, \quad (14)$$

wobei e und g für den angeregten bzw. den Grundzustand, r für den Ortsoperator des Elektrons, E_0 für die elektrische Feldkomponente der einfallenden Strahlung, \hbar für das Planck'sche Wirkungsquantum, γ für das gyromagnetische Verhältnis und B für das Magnetfeld stehen.

Da die genaue Rabifrequenz experimentell nur sehr schwer zu erreichen ist, wird meist nur eine Frequenz nahe der Rabifrequenz eingestrahlt. Das bisher betrachtete resonante Störfeld wird zu einem verstimmt Störfeld mit einer Verstimmung von δ . Daraus ergibt sich für die Rabi-Oszillation:

$$\Omega'_{\text{Rabi}} = \sqrt{\Omega_{\text{Rabi}}^2 - \delta^2}. \quad (15)$$

Und somit für die Besetzungswahrscheinlichkeiten:

$$p_g(t) = |c_g(t)|^2 \quad (16)$$

und

$$p_e(t) = |c_e(t)|^2. \quad (17)$$

Die Ausdrücke $c_g(t)$ und $c_e(t)$ können durch Lösen der zeitabhängigen Schrödinger-Gleichung zu den folgenden Gleichungen bestimmt werden[13]:

$$c_g(t) = \left[\cos\left(\frac{\Omega'_{\text{Rabi}} t}{2}\right) - i \frac{\delta}{\Omega'_{\text{Rabi}}} \sin\left(\frac{\Omega'_{\text{Rabi}} t}{2}\right) \right] e^{i \frac{\delta t}{2}}, \quad (18)$$

$$c_e(t) = -i \frac{\Omega_{\text{Rabi}}}{\Omega'_{\text{Rabi}}} \sin\left(\frac{\Omega'_{\text{Rabi}} t}{2}\right) e^{-i \frac{\delta t}{2}}. \quad (19)$$

Somit lassen sich die Besetzungswahrscheinlichkeiten wie folgt umschreiben:

$$p_e(t) = \left(\frac{\Omega_{\text{Rabi}}}{\Omega'_{\text{Rabi}}} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\Omega'_{\text{Rabi}} t}{2} \right) \quad (20)$$

$$p_g(t) = 1 - p_e(t). \quad (21)$$

2.4 Blochkugel und Quantum Bits

Kapitel 2.5.1 zeigt, dass sich ein NV-Zentrum ebenfalls als Quantum Bit (kurz Qubit) beschreiben lässt. Ein Qubit ist dem klassischen Bit sehr ähnlich. Ein klassisches Bit besitzt zwei Möglichkeiten: Den Zustand 0 oder den Zustand 1, ein Qubit besitzt diese ebenfalls $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Der wesentliche Unterschied zwischen den Bits besteht darin, dass ein Qubit auch Werte zwischen den Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ annehmen kann[16]. Dies wird dann als eine lineare Kombination oder auch Superposition bezeichnet. Dabei lässt sich jeder Zustand als ein Punkt auf einer Kugeloberfläche beschreiben. Diese Kugel wird als Blochkugel bezeichnet (Abbildung 7).

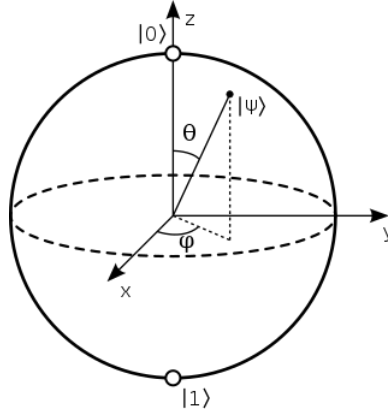


Abbildung 7: Blochkugel mit den Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Gezeigt wird dabei ein beliebiger Zustand $|\psi\rangle$, der sich durch den polaren Winkel θ und dem azimutalen Winkel ϕ beschreiben lässt.[16]

Die in Abbildung 7 gezeigte Blochkugel besteht dabei aus zwei reinen Zuständen: $|0\rangle$ und $|1\rangle$, die jeweils an dem oberen bzw. unteren Pol lokalisiert sind. Die weiteren Zustände zwischen den Polen können dann als Superposition aus den beiden reinen Zuständen geschrieben werden: $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ wobei für $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ gilt, da der Zustand normiert sein muss. Für die Blochkugel führt dies zu folgendem Ausdruck[17]:

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle. \quad (22)$$

Dabei gilt: $0 \leq \theta \leq \pi$ sowie $0 \leq \phi \leq 2\pi$. Der Zustand eines Qubits wird im Modell der Blochkugel als ein Vektor im zweidimensionalen komplexen Vektorraum dargestellt. Dabei formen die reinen Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ die Orthonormalbasis des Vektorraums.

Dieser Zustand kann dann durch Operatoren manipuliert werden. Der Operator muss dabei unitär sein und somit die Bedingung $\hat{U} \hat{U}^\dagger = \hat{U}^\dagger \hat{U} = \mathbf{1}$ erfüllen. Soll der Zustand $|\psi\rangle$ um einen beliebigen Winkel oder um eine beliebige Achse $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)$ gedreht werden, besitzt der unitäre Operator die folgende Form:

$$\hat{U} = e^{-i\frac{\theta}{2}\sigma_a}. \quad (23)$$

Wobei für $\sigma_a = \vec{a}\sigma = a_x\sigma_x + a_y\sigma_y + a_z\sigma_z$ gilt. Dabei stehen σ_x , σ_y und σ_z für die Paulimatrizen, mit denen jede Position auf der Blochkugel erreicht werden kann.

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

Aus diesen drei Pauli Matrizen können dann verschiedene unitäre Operatoren kreiert werden. Die Wichtigsten bilden dabei das NOT-Gate (X), das Z-Gate (Z) und das Hadamard-Gate (H)[17]. Diese wirken dann wie folgt auf einen Quantenzustand:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle &\xrightarrow{X} \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle \\ \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle &\xrightarrow{Z} \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle \\ \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle &\xrightarrow{H} \alpha\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} + \beta\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Nach Anwenden des Hadamard-Gatter entsteht eine Superposition. Ein solcher Superpositionszustand kann nicht direkt gemessen werden. Es können nur die Zustände $|0\rangle$ oder $|1\rangle$ bestimmt werden. Bei einer Superposition aus den Zuständen wird dann mit einer Wahrscheinlichkeit von $|\alpha|^2$ der Zustand $|0\rangle$, und mit einer Wahrscheinlichkeit von $|\beta|^2$ der Zustand $|1\rangle$ gemessen. Bei jeder projektiven Messung geht jedoch die ursprüngliche Superposition verloren.

Um mit Qubits Rechenoperationen durchzuführen, werden, ähnlich wie bei klassischen Bits, mehrere Qubits benötigt. Bei zwei klassischen Bits existieren dabei die Zustände 00, 01, 10 und 11, bei zwei Qubits $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$, sowie die Superpositionen aus diesen Zuständen[17]:

$$|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle, \quad (26)$$

Aufgrund der Normierung gilt dann: $\sum_{x \in \{0,1\}} |\alpha_x|^2 = 1$. Wenn ein Computer nun etwas berechnen soll, so erlaubt es die Superposition in diesem Fall, aus zwei Qubits, diese zu tätige Operationen bei bestimmten Algorithmen gleichzeitig auszuführen[18]. Ein Computer aus klassischen Bits würde im Vergleich die Operationen nacheinander tätigen. Dies führt zu einer deutlich erhöhten Effizienz eines Computers aus Qubits im Vergleich zu einem Computer auf Basis klassischer Bits. Umso mehr Qubits verwendet werden, desto schneller wird die Operation ausgeführt.

2.5 Kernspin

Im Vergleich zu den benachbarten Kohlenstoffatomen des Diamanten besitzt das Stickstoffatom, und somit das NV-Zentrum, einen Kernspin. Dieser beträgt bei ^{15}N $I = \pm\frac{1}{2}$ (in Abbildung 2.5 als \uparrow und \downarrow bezeichnet) und bei ^{14}N $I = 0, \pm 1$ und lässt sich durch die Anzahl an Nukliden erklären[14]. Ein Kernspin ungleich Null führt zu einer Wechselwirkung mit dem Elektronenspin und somit zu einer weiteren Aufspaltung der Energieniveaus des NV-Zentrums. Diese Aufspaltung wird als Hyperfeinstruktur bezeichnet und ist im Vergleich zu der Aufspaltung des Elektronenspins sehr gering. Die Aufspaltung der Energieniveaus ist dabei in Abbildung 2.5a für den Elektronenspin $m_s = -1$ gezeigt. Damit bestehen zwei vom Kernspin abhängende Möglichkeiten, in den $m_s = \pm 1$ Zustand anzuregen ($|0, \uparrow\rangle \rightarrow |\pm 1, \uparrow\rangle$, bei einer Frequenz von ν_{\uparrow} sowie $|0, \downarrow\rangle \rightarrow |\pm 1, \downarrow\rangle$ bei einer Frequenz von ν_{\downarrow}). Der Abstand zwischen den $|\uparrow\rangle$ und $|\downarrow\rangle$ beträgt dann $A_{gs} = -3.05$ MHz. Diese sind im ODMR-Spektrum bei hoher Auflösung sichtbar und in Abbildung 2.5b gezeigt. Dabei wurden Messungen zu unterschiedlichen angelegten Magnetfeldern gemacht. Es ist erkennbar, dass das Spektrum abhängig von dem angelegten Magnetfeld ist. Bei einer bestimmten Magnetfeldstärke werden aus den zwei Dips ein Einzeler.

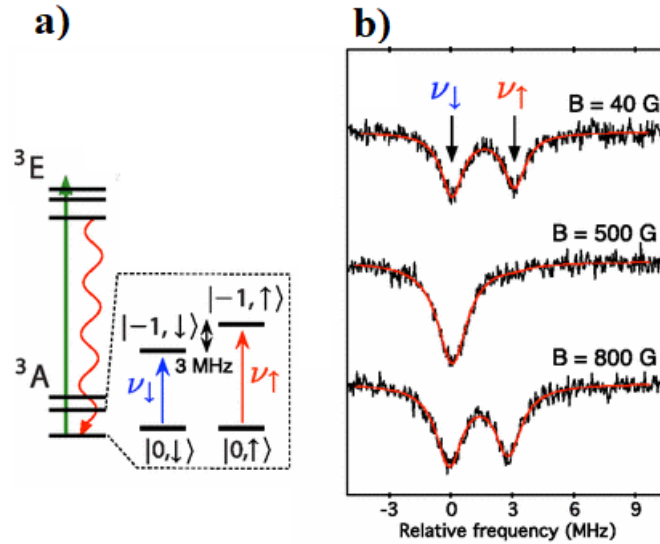


Abbildung 8: a) Energieschema des NV- Zentrums unter Betrachtung der Hyperfeinstruktur durch die Elektronen- und Kernspin-Wechselwirkungen. Betrachtet wird dabei nur der $m_s = -1$ Zustand des Elektronenspins. b) ODMR-Spektroskopie der Hyperfeinstruktur zu unterschiedlicher äußerer Magnetfeldstärke (von 40 G bis 800 G).[14]

2.5.1 Benutzung des NV-Zentrums als Qubit

Soll ein NV-Zentrum als in Kapitel 2.4 erklärtes Qubit genutzt werden, muss einiges beachtet werden. Zunächst wurde in Kapitel 2.5 bereits auf den Kernspin des NV-Zentrums eingegangen, sowie darauf, dass es möglich ist, diesen durch ein äußeres Magnetfeld aufzuspalten. Doch zusätzlich zu dem NV-Zentrum besitzt auch ein kleiner Anteil des Diamanten einen Kernspin ungleich Null. Der Diamant besteht zu 98.9% aus ^{12}C -Isotopen, welche einen Gesamtkernspin von Null haben. Der restliche Anteil von 1.1% besteht aus ^{13}C -Isotopen[20], welche ein zusätzliches Neutron und somit eine ungerade Anzahl von Nuklidern besitzen. Dies führt zu einem Kernspin von $I = \frac{1}{2}$, welcher mit benachbarten NV-Zentren wechselwirkt.

Zusätzlich zu den Kohlenstoffatomen im Diamanten kommt auch Stickstoff in Isotopen vor[19]. Somit kann ein Kernspin $I = \frac{1}{2}$ ($m_n = \pm \frac{1}{2}$) bei ^{15}N , sowie $I = 1$ ($m_n = 0, \pm 1$) bei ^{14}N auftreten[22].

Der Grund, warum NV-Zentren interessant für Qubits und quantum computing sind, liegt in der langen Kohärenzzeit des Kernspins. Diese ist dabei deutlich länger als die Kohärenzzeit des Elektronenspins. Zusätzlich kann die Nutzung bei Raumtemperatur betrieben werden, im Gegensatz zu anderen Möglichkeiten, welche ein Vakuum oder Temperaturen nahe 0 K voraussetzen[22].

2.5.2 ODMR-Spektren unter Berücksichtigung der Kernaufspaltung

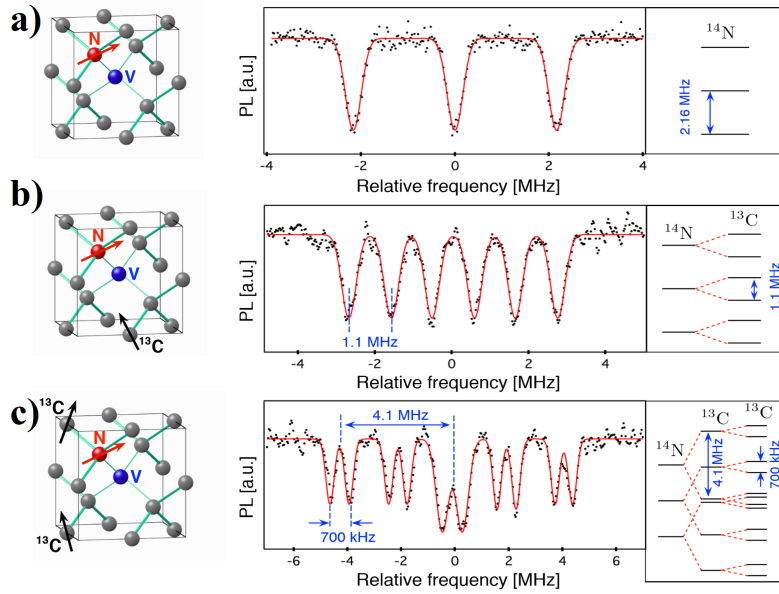


Abbildung 9: Verschiedene ODMR-Frequenzspektren für a) kein ^{13}C -Isotop in der unmittelbaren Nähe des NV-Zentrums, b) ein ^{13}C -Isotop in der unmittelbaren Nähe des NV-Zentrums und c) zwei ^{13}C -Isotope in der unmittelbaren Nähe des NV-Zentrums.[21]

Abbildung 9 zeigt abschließend ODMR-Frequenzspektren je nachdem ob kein, ein oder zwei ^{13}C -Isotop(e) in der unmittelbaren Nähe des NV-Zentrum sind. Zusätzlich ist die Aufspaltungsgröße der Hyperfeinstruktur gezeigt, welche mit Zunahme von ^{13}C -Isotopen immer geringer wird. Es ist erkennbar, dass die Messung immer genauer sein muss, um solche NV-Zentren nachweisen zu können.

3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird zunächst auf den bereits vorhandenen Versuchsaufbau, sowie dessen Erweiterung eingegangen. Dabei wird der bereits vorhandene Versuchsaufbau nur grob erläutert, da dieser bereits ausführlich in anderen Bachelorarbeiten erklärt worden ist[24][25]. Im zweiten Teil des Versuchsaufbaus wird auf den neu hinzugefügten Part eingegangen.

3.1 Vorhandener Versuchsaufbau

Der bereits vorhandene Versuchsaufbau wird zur besseren Übersicht in zwei Abschnitte gegliedert. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit dem Aufbau des Lasers und dem akustooptischen Modulator, im Nachfolgenden als AOM abgekürzt. Dieser ist in Abbildung 10 (oben) gezeigt. Der zweite Abschnitt zeigt den Aufbau des Mikroskops, ebenfalls gezeigt in Abbildung 10 (unten).

Der erste Teil besteht aus einem Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm. Dieser besitzt eine konstante Leistung. Mit den darauf folgenden zwei Bauteilen wird sowohl die Polarisierung bereinigt als auch die Intensität beeinflusst. Danach wird der Laserstrahl mittels Linse auf das AOM fokussiert. Das AOM besteht im Inneren aus einer Quarzverbindung, welche mittels Schallwellen zum Schwingen gebracht wird. Dies führt zu einem optischen Gitter und somit zu Interferenz. Bis auf die erste Ordnung werden alle Ordnungen an der Blende geblockt. Dies hat zur Folge, dass durch das AOM der Laserstrahl schnell (≈ 50 ns) geschaltet werden kann. Der zweite Durchlauf durch das AOM erhöht weiter die Effizienz. Nach dem AOM wird der Strahl auf die Faser fokussiert und trifft auf den zweiten Teil des Versuches. Der zweite Teil zeigt den Aufbau des Konfokalmikroskops. Nachdem der Laserstrahl die Faser verlässt, muss die Polarisierung neu eingestellt werden, da die Faser nicht polarisationserhaltend ist. Dazu wird der in Abbildung 10 dargestellte Aufbau aus den $\frac{\lambda}{2}$ -Platten (WPH), sowie der $\frac{\lambda}{4}$ -Platte (kurz WPQ) und einem polarisierenden Strahlteiler (PBS) genutzt.

Nachdem der einfallende Strahl diesen Teil passiert hat, trifft er auf einen Strahlteiler (BS), welcher einen Teil zu einer Photodiode reflektiert. Diese ermöglicht eine Intensitätsmessung. Der restliche Teil wird transmittiert. Der transmittierte Strahl trifft dann auf einen dichroitischen Spiegel. Dieser wirkt für kleinere Wellenlängen als Spiegel, jedoch für größere nicht. Das Laserlicht besitzt eine Wellenlänge von 532 nm, welches zum Großteil reflektiert wird (zwischen 90-95%), jedoch nicht vollständig. Dies ist zunächst bei dem eintreffenden Strahl nicht relevant, da die 5-10% des Strahls den zu messenden Strahl nicht weiter beeinflussen. Dennoch muss dies bei dem vom Diamanten reflektierenden Strahl beachtet werden. Nachdem der Strahl zum Großteil reflektiert wurde, trifft dieser auf das Objektiv, welches ihn auf den Diamanten fokussiert.

Die NV-Zentren im Diamant absorbieren die Photonen des Laserstrahls und emittieren Photonen längerer Wellenlängen, welche zufällig in beliebige Raumrichtungen abgegeben werden. Davon wird ein Teil der Fluoreszenz über das Objektiv aufgefangen, kollimiert und auf den dichroitischen Spiegel geleitet. Allgemein wird hierbei entweder ein Objektiv mit 100-facher oder 50-facher Vergrößerung genutzt. Der von dem Objektiv auf den dichroitischen Spiegel geleitete Strahl besteht aus Photonen mit einer Wellenlänge von 532 nm (von der Diamantoberfläche reflektierter Strahl) und Photonen mit einer Wellenlänge von ca. 637 nm, welche aus der Fluoreszenz der NV-Zentren entstanden sind. Diese gilt es zu messen. Die Wellenlänge von 637 nm wird dabei an dem dichroitischen Spiegel transmittiert und durch die Tubuslinse fokussiert. Da der Strahl immer noch einen Anteil von Photonen mit einer Wellenlänge von 532 nm hat, wird ein Longpassfilter benötigt, welcher eben diese Photonen zu 99.999% blockiert. Danach kann je nach Position des Klappspiegels der Strahl

auf eine CCD-Kamera oder eine Faser treffen, um dort detektiert zu werden.

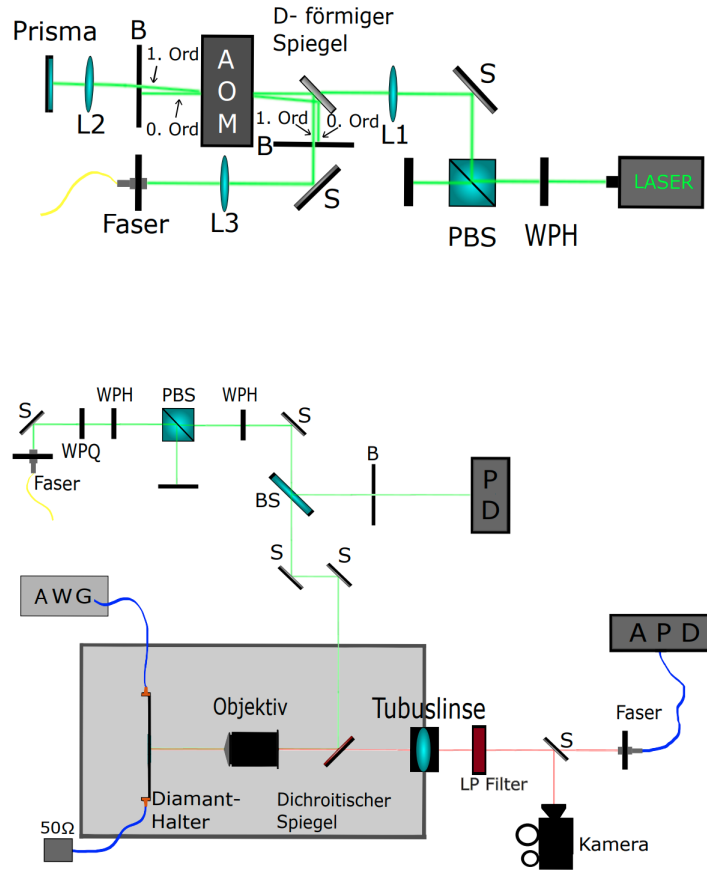


Abbildung 10: Skizze des Experiments. Der erste Teil (oben) beschreibt dabei den Aufbau um den AOM und der zweite Teil (unten) den Aufbau des Konfokalmikroskops, an welchem die Probe untersucht werden kann. In der Skizze ist dabei der zusätzliche Aufbau, um welchen es in der Bachelorarbeit geht, nicht abgebildet.

Die CCD-Kamera dient hauptsächlich zur Orientierung auf dem Diamanten. Dieser besitzt eine spezielle Implementierung, welche in Abbildung 19 gezeigt ist. Mit der Kamera können dabei die ersten beiden Linien sichtbar gemacht werden, sowie die dritte errahnt werden. Da die Linien immer einen fest definierten Abstand besitzen, kann somit die Position der Linien kleinerer Konzentrationen geschätzt werden. Dies ist notwendig, wenn nur ein einzelnes NV-Zentrum betrachtet werden soll, um Wechselwirkungen mit anderen NV-Zentren auszuschließen. Um ODMR zu betreiben, muss sich das NV-Zentrum in der unmittelbaren Umgebung von dem Golddraht befinden ($\approx 30\mu\text{m}$). Dieser Draht ist ebenfalls durch die CCD-Kamera sichtbar.

Um die Fluoreszenz des NV-Zentrums zu messen, wird eine APD genutzt. Avalanche bedeutet dabei zu Deutsch "Lawine". Diese Bezeichnung ist auf die Messmethode zurückzuführen, welche die APD nutzt. Dabei trifft ein einzelnes Photon auf den Detektor und löst ein Elektron durch den inneren photoelektrischen Effekt aus. Dieses wird durch eine angelegte Spannung beschleunigt und löst durch Stoßionisation weitere Elektronen frei. Diese sogenannten Sekundärladungsträger lösen weitere Elektronen, sodass es zu einem lawinenartigen Effekt kommt. Dieser ist dann messbar. Dadurch können einzelne Photonen detektiert werden.

3.2 Erweiterung des Versuchsaufbaus

Die Erweiterung des Aufbaus besteht darin, ein System zu konstruieren, welches das Experiment um ein Magnetfeld mittels einer Permanentmagnetkugel erweitert. Die Kugel und somit die Magnetfeldachse soll frei im Raum, bei bestimmtem Abstand zum NV-Zentrum, bewegt werden können. Ermöglicht wird dies durch drei Motoren. Dabei können sich zwei Motoren um eine eigene Achse drehen und der dritte Motor eine Distanz abfahren. Da die Bewegung kreisförmig um das NV-Zentrum stattfinden soll, bietet es sich an, das Problem in Kugelkoordinaten zu beschreiben. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten beschrieben, wie der Aufbau umgesetzt werden kann, beziehungsweise umgesetzt wurde.

3.2.1 Hängender Aufbau

Die erste und offensichtlichste Methode ist der Aufbau mit einem rechten Winkel zwischen dem kleinen Motor, welcher im Kugelkoordinatensystem den polaren Winkel darstellt, und dem großen Motor, welcher den azimuthalen Winkel darstellt. Vorteil dabei ist, dass die Bewegungen unabhängig voneinander sind. Das bedeutet, dass wenn der Neigungswinkel der Magnetfeldachse verändert werden soll, sich nur ein einziger Motor bewegen muss. Der Versuchsaufbau ist dabei in Abbildung 11 gezeigt.

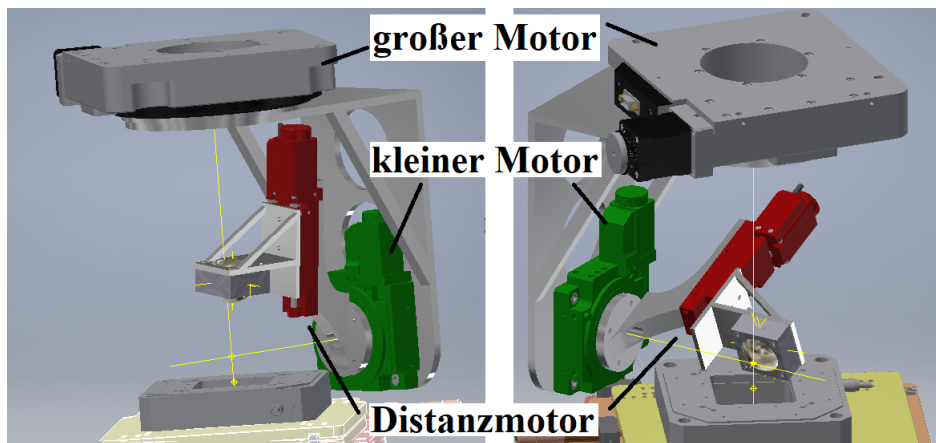


Abbildung 11: Möglicher Aufbau, bei welchen die Motoren oberhalb des Experiments angebracht werden (erstellt in Inventor).

Dieser Aufbau hat jedoch einige Nachteile. Der größte Nachteil besteht darin, dass es nicht möglich ist, die Magnetkugel bei möglichst kleinem Raumvolumen nahe genug an den Diamanten zu bringen. Ursache hierfür ist das bereits stehende Setup, speziell die Diamanthalterung. Um das Magnetfeld in alle Richtungen auszurichten, muss der südlichste Punkt der Magnetkugel im Schnittpunkt der Drehachsen des polaren sowie azimuthalen Motors sein. Daher muss der polare Motor tiefer ausgerichtet sein als der Diamant. Da der azimuthale Winkel um ca. 180° drehbar sein muss, bedeutet dies, dass mindestens ein Halbkreis um die Halterung existieren muss, der abgefahren werden kann. Dieser hat dann jedoch, da der Diamanthalter eine rechteckige Form besitzt, einen großen Radius. Dies hat die Folge, dass die Bewegungsbahn der Magnetvorrichtung sich dann mit den, entweder für die x- oder y-Richtung verschiebenden Piezomotoren schneidet. Daher müsste der Radius größer gewählt werden, welches das Raumvolumen eben so vergrößern würde.

3.2.2 Seitlicher Aufbau

Aus den Nachteilen des vorherigen Aufbaus entstand die Option das Magnetpositionierungssystem seitlich zu positionieren mit nur einem Fuß, welcher in der Höhe verstellbar ist. Dies bietet den Vorteil, dass zum einen das Volumen gegenüber dem ersten Aufbau minimiert wird und zum anderen der Diamant durch bestimmte gewählte Einstellungen problemlos dicht erreicht werden kann (Abbildung 12). Jedoch besitzt auch diese Vorrichtung einen Nachteil, den der vorige Versuchsaufbau nicht aufweist. Es ist nicht der gesamte Halbkreis abfahrbar, sondern nur ein Teil. Zwar liegt dieser Teil über 50%, im Vergleich jedoch zu dem anderen geschilderten Aufbau, welcher theoretisch 100% des Halbkreises abfahren könnte, ist dies geringer. Der Vorteil, beliebig nahe an den Diamanten fahren zu können, überwiegt jedoch, weshalb sich für diesen Aufbau entschieden wurde.

Wie bereits in den Grundlagen erläutert, existieren vier Möglichkeiten wie das NV-Zentrum im Diamant angeordnet sein kann. Davon können drei der vier NV-Achsen mit diesem Versuchsaufbau abgedeckt werden, sodass statistisch gesehen jedes dritte NV-Zentrum für die Magnetfeldaufspaltung geeignet ist.

In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass das Magnetpositionierungssystem grob in vier unterschiedliche Module aufgeteilt werden kann. Das erste Modul ist der Ständer, welcher anschließend auf dem Tisch mittels Klemmen befestigt wird. An dem Ständer ist dann der große Motor angebracht. Das zweite Modul besteht aus der Verbindungsachse zwischen dem großen und dem kleinen Motor. Der dritte Teil bildet die Verbindung zwischen dem kleinen rotierenden Motor und dem Distanzmotor. Der vierte und somit letzte Teil des Magnetpositionierungssystems bildet die Magnethalterung. Die einzelnen Komponenten werden in Kapitel 4.1 genauer erläutert.

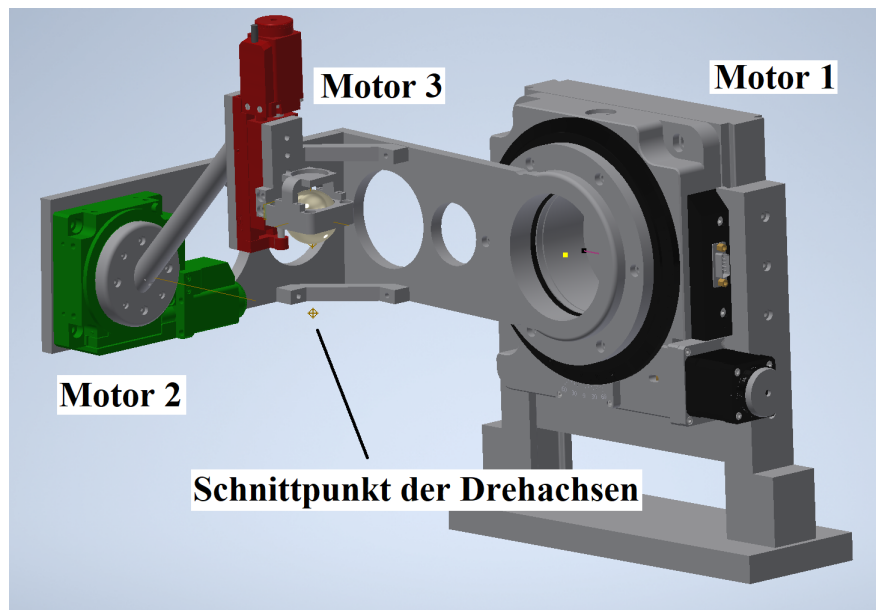
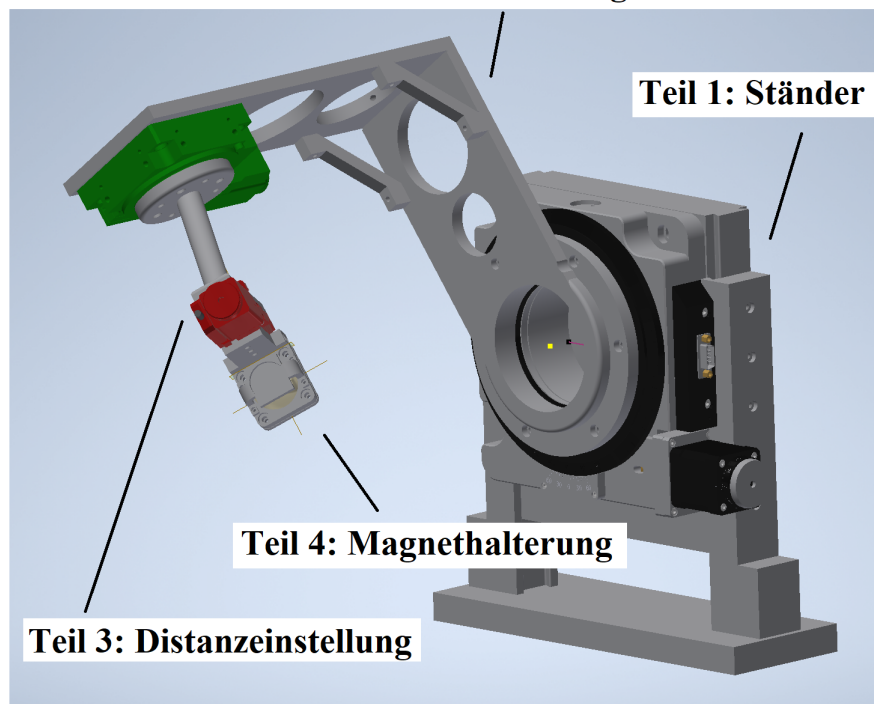
**Teil 2: Winkeleinstellung**

Abbildung 12: Aufbau des Experiments, erstellt in Inventor. Dies ist der finale Aufbau, welcher im späteren Verlauf realisiert wird. Der Aufbau kann dabei in vier unterschiedliche Module unterteilt werden: der Ständer, die Winkeleinstellung, die Distanzeinstellung und die Magnethalterung. Der Punkt, an dem sich die Drehachsen des großen und des kleinen Motors schneiden, ist in gelb gekennzeichnet.

4 Magnetpositionierungssystem

In diesem Teil der Bachelorarbeit soll auf das Positionierungssystem für den Magneten eingegangen werden. Dabei werden zunächst die einzelnen Bauteile betrachtet, sowie das zugehörige Programm erläutert. Anschließend wird das Magnetfeld in Abhängigkeit zur Distanz zwischen Diamanten und Magnetkugel bestimmt.

4.1 Aufbau des Magnetpositionierungssystems

In Abbildung 12 ist bereits der Aufbau des Magnetpositionierungssystems gezeigt. Dabei wurde jedoch noch nicht auf die einzelnen Komponenten und deren Zweck eingegangen. Dies wird im nachfolgenden getan.

Teil 1: Ständer: Da im überarbeiteten Tilt-Tip-Tisch für den Diamant eine Höhenverstellung eingebaut wurde, muss das Magnetpositionierungssystem ebenfalls eine aufweisen[26]. Da bei diesem Aufbau nur eine einzige Stütze verwendet wird, kann dies gut ermöglicht werden. In Abbildung 12 ist eine mögliche Höhenverstellung sichtbar. Dies wurde mittels einer Schiene realisiert. Dabei wurde die Schiene nicht quadratisch gewählt, sondern dreieckig, was einen besseren Halt ermöglicht. Wenn die genutzte Höhe gefunden ist, muss das Magnetpositionierungssystem befestigt werden. Dafür wurde ein Aluminiumblock und Aluminiumplatten zur groben Einstellung und Sicherung genutzt. Um eine genaue Einstellung zu erreichen, sind an den Seiten Schrauben eingedreht. Diese werden dann festgedreht, sodass genug Druck auf die Platte wirkt.

Teil 2: Winkeleinstellung: Zum zweiten Teil des Setups gehören die beiden sich drehenden Motoren und deren Verbindung. Um den Ständer und den großen Motor nicht unnötig zu belasten, wurde die Verbindung mit Löchern versehen was zu einer Verringerung der Masse führt. Zusätzlich können durch die Löcher die Kabel der anderen Motoren gelegt werden. Die Halterung wurde so konzipiert, dass die Motoren im 90° Winkel zueinander stehen. Grund hierfür ist, dass sich die Drehachsen im 90° Winkel schneiden müssen, damit diese den polaren und azimutalen Winkel in einem um -90° gedrehten Kugelkoordinatensystem darstellen. Der Schnittpunkt wurde knapp über den Diamanten gelegt, sodass die Motoren frei um diesen rotieren können und das Magnetfeld dabei nach der Kalibrierung immer direkt auf den Diamanten zeigt. Falls der Schnittpunkt nicht direkt auf dem Diamanten liegt, kann dieser durch Variation der Höhe und des Verschiebens des Ständers angepasst werden.

Durch Drehung der Motoren um die Achsen kann das Magnetfeld zu der NV-Achse ausgerichtet werden. Die Winkel, um die gedreht werden können, entsprechen dabei nicht dem polaren oder azimutalen Winkel in einem von oben betrachteten Kugelkoordinatensystem. Der Winkel des kleinen Motors (im nachfolgenden als θ_S bezeichnet) entspricht dabei einer Drehung um die x-Achse, wenn der Winkel des großen Motors auf 0° steht. Der Winkel des großen Motors (im nachfolgenden als θ_B bezeichnet) entspricht einer Drehung um die y-Achse. Das Kugelkoordinatensystem ist daher um 90° um die x-Achse gedreht. Daher muss eine Koordinatentransformation durchgeführt werden, um die genauen Positionen der x' -, y' - und z' -Komponenten zu bestimmen.

Um dies zu ermöglichen, wird die Drehmatrix um die x-Achse auf die x-, y- und z-Komponente des um 90° gekippten Koordinatensystems angewandt:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}, \quad (27)$$

wobei α für den Winkel steht, um den gedreht wird.

Durch die beiden Motoren könnten somit alle Positionen in dem Halbkreis abgefahren werden. Da jedoch zusätzlich zu dem Aufbau des Magnetpositionierungssystems weitere Komponenten zum Experiment gehören, gibt es dennoch Einschränkungen. Der große Motor arbeitet in einem Bereich zwischen 0° und 120° und der kleine Motor in einem Bereich von -90° und 90°.

Teil 3: Distanzeinstellung: Nachdem die Magnetfeldachse parallel zur NV-Achse einstellbar ist, soll ebenfalls die Magnetfeldstärke veränderbar sein. Dazu wird ein weiterer Motor genutzt. Dieser ist nicht im Winkel verstellbar, sondern verändert lediglich die Distanz zwischen dem Diamanten und der Magnetkugel. Der Teil des Aufbaus besteht aus insgesamt vier Komponenten, wobei drei davon den kleinen Motor mit dem Distanzmotor verbinden. Wie bereits im zweiten Teil des Aufbaus erwähnt, bestehen auch diese Komponenten aus Aluminium und wurden möglichst klein im Raumvolumen gewählt, um die Belastung bei dem großen drehbaren Motor zu minimieren. Die Länge des Zylinders wurde dabei mit der Länge der Halterung in Teil zwei abgestimmt, sodass der Distanzmotor den Magneten an den Schnittpunkt der beiden Drehachsen heranzufahren kann.

Teil 4: Magnethalterung: Im letzten Teil des Aufbaus wird das Magnetfeld mittels eines kugelförmigen Permanentmagneten erzeugt. Die Magnetkugel besitzt einen Durchmesser von 1.5 Zoll ($\approx 38,1$ mm) und eine Magnetfeldstärke von 8815 Gauss (881.5 mT) auf der Oberfläche[27]. Es wurde dabei ein kugelförmiger Magnet gewählt, um möglichst nahe an den Diamanten heranzufahren zu können, ohne dass dieser bei einer beliebigen Veränderung der Winkel den Diamanten beziehungsweise dessen Halterung berühren kann. Die Halterung des Magneten besteht ebenfalls aus Aluminium, zum einen um den großen Drehmotor nicht weiter zu belasten und zum anderen, da das Material nicht magnetisch ist. Ebenfalls wurden keine magnetischen Schrauben genutzt. In Abbildung 12 ist zusätzlich zu erkennen, dass über dem Magnet eine brückenähnliche Halterung angebracht ist. Diese dient der genauen Ausrichtung.

4.2 Ausrichtung des Magneten

Um das Magnetpositionierungssystem zu verwenden, muss der Magnet zunächst ausgerichtet werden. Da es sich um eine Kugel handelt, ist die Ausrichtung der Magnetfeldlinien nicht trivial. Der Nord- bzw. Südpol ist nicht erkennbar. Um die Ausrichtung möglichst genau zu erzielen, wurde die im vierten Teil des Aufbaus erläuterte brückenähnliche Konstruktion genutzt. In dem Bauteil befindet sich an der oberen Seite eine Einkerbung in Form eines Kreises in dem ein weiterer Magnet gesetzt werden kann. Der dabei verwendete Magnet hat eine zur Einkerbung passende zylinderartige Form, sodass der Nord- bzw. Südpol bekannt ist. Wird dieser Magnet in die Halterung gesetzt, richtet sich der kugelförmige Magnet aus, wobei dann die Halterung festgeschraubt werden muss, sodass der Kugelmagnet nicht weiter bewegt werden kann. Zur Prüfung der korrekten Ausrichtung wurde ein 3D Magnetsensor genutzt. Der von der Firma Infineon stammende 3D Magnetsensor zeigt mittels eines Programms die Magnetfeldstärke in B_x -, B_y - und B_z -Richtung an. Die z -Komponente beschreibt dabei die für den Versuch relevante Magnetfeldachse. Bei einer idealen Ausrichtung sollten B_x und B_y ca. den Wert Null haben und sich bei Variation der Distanz zwischen dem Kugelmagnet und dem 3D Magnetsensor nicht verändern. Auf die Messung wird in Kapitel 4.4 eingegangen.

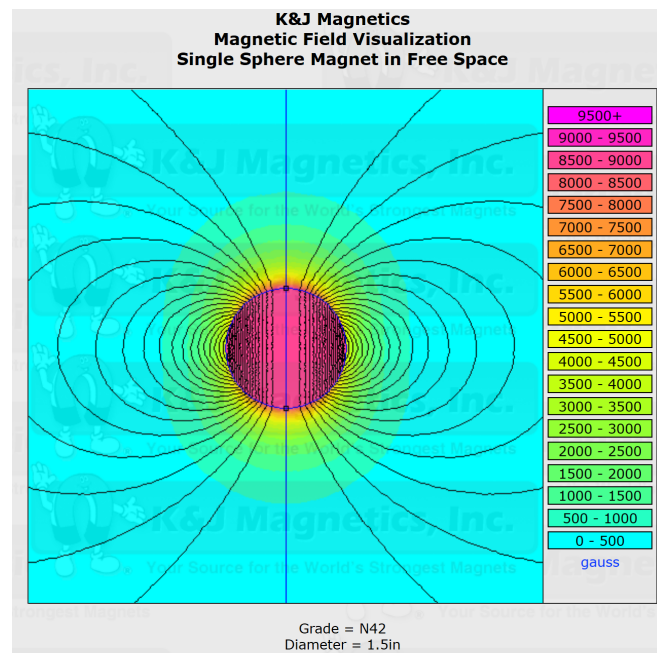


Abbildung 13: Vom Hersteller K&J Magnetics Inc. angegebenes Magnetfeld des genutzten Kugelmagneten[27].

In Abbildung 13 ist das Magnetfeld des genutzten Kugelmagneten gezeigt. Die magnetische Flussdichte der Oberfläche entspricht nach Herstellerangaben einem Wert von 8815 Gauss bzw. 881.5 mT.

4.3 Steuerungsprogramm

Zusätzlich zur Konstruktion des Magnetpositionierungssystems wurde ebenfalls ein Programm mit entsprechendem *Graphical User Interface* (GUI) für die Steuerung entwickelt. Das Programm nutzt dabei die zu den Motoren gehörende Bibliothek, um die drei Motoren mittels zweier Controller zu steuern. Als Programmierungsumgebung wurde sich für die OpenSource Umgebung Qt Creator entschieden, da die gesamten anderen Geräte ebenfalls mittels dieser Umgebung gesteuert werden, und somit die Verknüpfung ohne Veränderung des Quellcodes hergestellt werden kann. Das Programm des Magnetpositionierungssystems besteht aus vier verschiedenen UI Fenstern, der Steuerung, der Positionen, der Grenzen sowie der Einstellungen. Im folgenden werden in den Abbildungen 14 bis 17 die UI Fenster dargestellt.

4.3.1 Hauptfenster

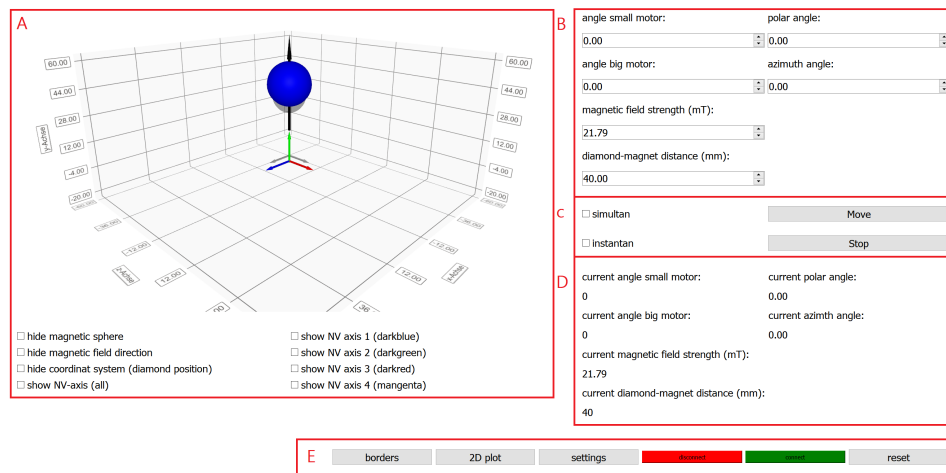


Abbildung 14: Das Hauptfenster des Steuerungsprogramms unterteilt sich in fünf Sektionen. Der erste Abschnitt A zeigt graphisch die momentane Position des Magneten, berechnet aus den Winkeln der Motoren. Abschnitt B zeigt das Eingabefeld, in welches die neuen Positionen eingegeben werden können. Im dritten Abschnitt C kann die Bewegung auf verschiedene Arten durchgeführt und gestoppt werden. Abschnitt D zeigt die momentanen Positionen. Der letzte Abschnitt E führt zu drei weiteren Fenstern, sowie zu der Option des Konnektieren mit den Controllern.

Das Hauptfenster, in dem die Steuerung der Motoren zum größten Teil stattfindet, ist in Abbildung 14 gezeigt. Dieses Fenster verknüpft die weiteren drei Fenster durch Buttons. Der Code dieses Fensters kann in Zukunft in einer anderen UI in Form eines Tabs oder Widgets hinzugefügt werden, ohne weitere Änderungen vornehmen zu müssen. Dabei wurde beachtet, diese Klasse so kurz wie möglich zu gestalten, um im späteren Verlauf eine bessere Übersicht zu ermöglichen. Das Fenster wurde in verschiedene Layouts unterteilt, die das Gesamtlayout bilden. Abbildung 14 zeigt die verschiedenen Layouts und teilt diesen einen Buchstaben zu. Die Abschnitte werden im Folgenden erläutert.

A: 3D Plot: Der erste Teil des Fensters ist eine graphische Darstellung der momentanen Position und Ausrichtung des Magnetfeldes. Dabei bildet das Koordinatensystem die Position des Diamanten. Die Kugel stellt den Magneten da und der Pfeil die Magnetfeldachse. Zusätzlich können auch die vier möglichen Ausrichtungen der NV-Achse im Diamanten angezeigt werden. Die einzelnen Komponenten können dabei mittels der acht Check-Boxen unter dem Fenster ein- oder ausgeblendet werden. Während der Bewegung wird der Plot den aktuellen Positionen alle 15 Millisekunden angepasst, sodass die Bewegung mittels dieses Layouts verfolgt werden kann.

B: Eingabefeld: Der zweite Teil des Fensters ist die Eingabe der anzufahrenden Positionen. Dabei können die Positionen der Winkel des kleinen und großen Motors (seitlich gekipptes Koordinatensystem), sowie Distanz direkt eingestellt werden, als auch die Magnetfeldstärke oder der azimutale und polare Winkel im von oben betrachteten Koordinatensystem. Es kann somit zu der jeweiligen Distanz die theoretisch berechnete Magnetfeldstärke abgelesen werden und umgekehrt bei jeder Magnetfeldstärke die Distanz. Dabei wurde die Abhängigkeit zwischen Magnetfeldstärke und Distanz zu dem NV-Zentrum im Vorhinein auf zwei verschiedene Weisen gemessen. Die Messungen werden in Kapitel 4.4 und Kapitel 5.3 beschrieben.

C: Bewegungsfunktion: Der dritte Teil des Fensters zeigt die Bewegung der Motoren. Die Bewegung ist dabei im Programm hauptsächlich in einer Funktion beschrieben. Die Funktion wird mittels eines Timers, welcher durch Drücken des Move-Buttons startet, alle 15 Millisekunden aufgerufen und bei Beendigung der Bewegung gestoppt. Der Timer wird genutzt, da die zu den Controllern gehörige Bibliothek keine Funktion besitzt, die solange aufgerufen wird, bis der Motor die geforderte Position erreicht. Durch das Nutzen eines Timers kann somit auch der 3D und der(die) 2D Plot(s) über den Zeitraum der Bewegung aktualisiert werden. Die Bewegung der Motoren kann dabei je nach Anwendung unterschiedlich durchgeführt werden (instantan, simultan oder separat). Wird der Haken bei *simultan* gesetzt, bewegen sich der kleine und große Motor gleichzeitig. Wird der Haken entfernt, bewegen sich die beiden Motoren nacheinander. Der Distanzmotor wird jedoch bei beiden Moden separat zu Beginn des Move-Befehls, oder am Ende des Move-Befehls bewegt, je nachdem ob die Distanz zwischen Diamant und Magnetkugel verringert oder vergrößert wird. Die zweite Check-Box ermöglicht eine instantane Bewegung. Wird diese aktiviert, wird bei Veränderung des Eingabefeldes mittels Tastatur oder Pfeiltasten die Bewegung instantan durchgeführt. Der Prozess der Bewegung kann dabei jederzeit mit dem Stop-Button angehalten werden.

D: Ausgabe: Zusätzlich zu dem 3D Plot werden auch die Parameter der Positionen, des Magnetfeldes und der Winkel während der Bewegung ständig aktualisiert und abgebildet. Um bei einer manuellen Drehung über die Knöpfe der Controller weiterhin aktuelle Werte über die Positionen zu erhalten, wurde ein weiteres Fenster eingebaut. Wird das Fenster geöffnet, werden hier die Werte im Sekundentakt aktualisiert, bis dieses wieder geschlossen wird.

E: Einstellungen: Das letzte Layout besteht aus verschiedenen Buttons, welche zum einen die drei anderen Fenster öffnen und zum anderen die Verbindung zu den Controllern aufbauen. Die *connect*- und *disconnect*-Buttons stellen eine Verbindung zwischen den Controllern und dem Programm her, oder lösen diese auf. Grund für die Buttons ist die Möglichkeit, dass bei einer Dekonnektierung das Programm nicht neu gestartet werden muss. Dies ist bei Nutzung mehrerer Geräte in einem Programm nützlich. Zusätzlich werden die Motoren nicht durchgehend gebraucht, sodass das Verbinden beim Starten des Programms vermeidbare Rechenzeit bedeuten würde.

Die Buttons '2D plot', 'border' und 'settings' rufen dann die jeweiligen anderen Fenster auf. Diese liefern weitere Informationen und wichtige Einstellungen, die das Hauptfenster unübersichtlich machen würden.

4.3.2 Positionsfenster

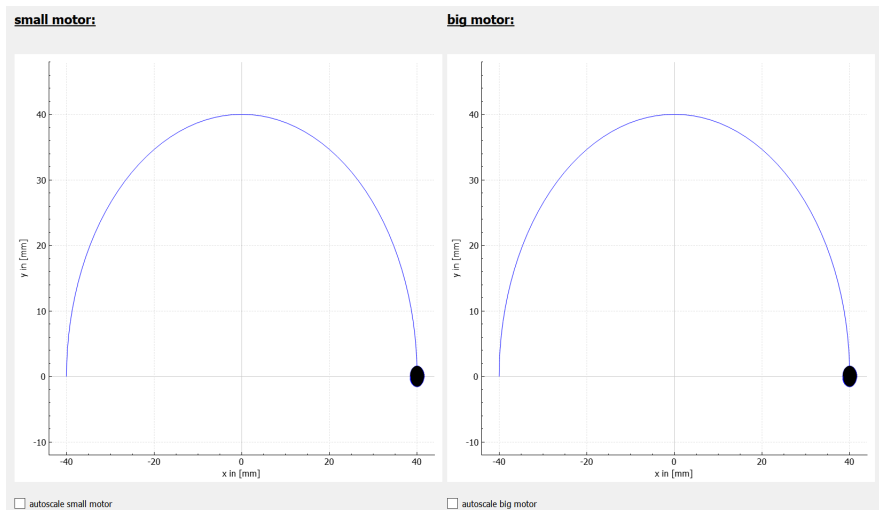


Abbildung 15: Erstes Unterfenster, welches mittels des Buttons '2D plot' auf dem Hauptfenster des Steuerungsprogramms aufgerufen werden kann. Das Fenster kann in zwei Parts aufgeteilt werden. Der linke Teil beschreibt die derzeitige Position des kleinen Motors und der rechte Teil die derzeitige Position des großen Motors.

Da im 3D Plot des Hauptfensters die Positionen der zwei Motoren nicht offensichtlich voneinander unterschieden werden können, wurde zusätzlich ein weiteres Fenster erstellt. Dieses ist in Abbildung 15 dargestellt. Das Fenster kann dabei in zwei Abschnitte unterteilt werden, bei denen jeder den Winkel einer der Motoren darstellt. Der abgebildete Halbkreis zeigt die abfahrbare Bewegung des jeweiligen Motors und der schwarze Punkt die momentanen Winkelposition an. Unter den jeweiligen Plots existiert eine Möglichkeit, die Achsen des Koordinatensystems automatisch zu setzen oder auf deren Abstand anzupassen. Bei der automatischen Ausrichtung wurde der maximale Abstand zwischen dem Magnet und dem Motor als Referenz benutzt. Wird die Distanz dann verändert, verändert sich auch der Radius des abgebildeten Halbkreises und die Position des Magneten wandert nach außen. Ist der Haken nicht gesetzt, verändert sich die Position des Motors, sowie der Radius des Halbkreises nicht, jedoch aber die Achsen des Koordinatensystems.

4.3.3 Einstellungsfenster

Das zweite Fenster ist in Abbildung 4.3.3 gezeigt und enthält weitere Informationen, sowie die Einstellung zum Setzen der Nullpunkte.

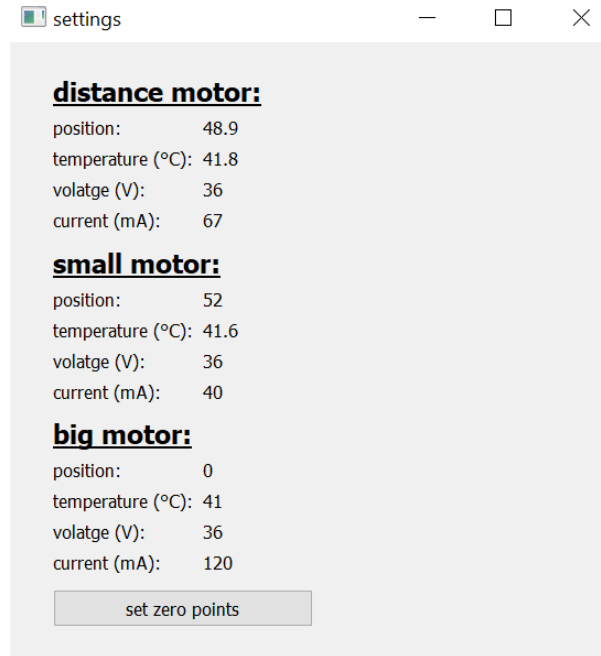


Abbildung 16: Zweites Unterfenster, welches mittels des Buttons 'settings' auf dem Hauptfenster des Steuerungsprogramms aufgerufen werden kann. Das Fenster kann in zwei Teile unterteilt werden. Der obere Teil zeigt zusätzliche Informationen, wie die Position, die Temperatur, die Spannung und die Stromstärke. Der untere Teil zeigt die Einstellungsmöglichkeit zum Setzen der Nullpunkte der rotierenden Motoren.

Der obere Teil liefert Informationen über die Motoren, welche durch einen Timer jede Sekunde aktualisiert werden. Wird das Fenster geschlossen, wird der Timer gestoppt, um Rechenzeit zu sparen. Durch das Fenster können somit Informationen über die derzeitige Position abgelesen werden, wenn der Motor an den Knöpfen des Controllers per Hand bedient wird. Dies erfasst das Hauptfenster im Vergleich dazu nicht als Bewegung. Die Information über Temperatur, Spannung und Stromstärke liefert weitere, sich sekundlich aktualisierende Details. Diese dienen zu einer Fehleranalyse, falls ein Motor keine Bewegung durchführt. Der Button 'set zero points' sollte nur im Ausnahmefall genutzt werden. Er setzt die Nullposition auf die derzeitige Position. Wenn diese an einer beliebigen Position gesetzt wird, müssen die im folgenden gezeigten Grenzen neu definiert werden, um keine Kollisionen herbeizuführen.

4.3.4 Grenzfenster

Das dritte Fenster ist in Abbildung 17 dargestellt und zeigt die Grenzen zu ausgewählten Winkeln. Das Fenster ist im Gegensatz zu den beiden Vorherigen statisch und benötigt keinen Timer, welcher dieses durchgehend aktualisiert.

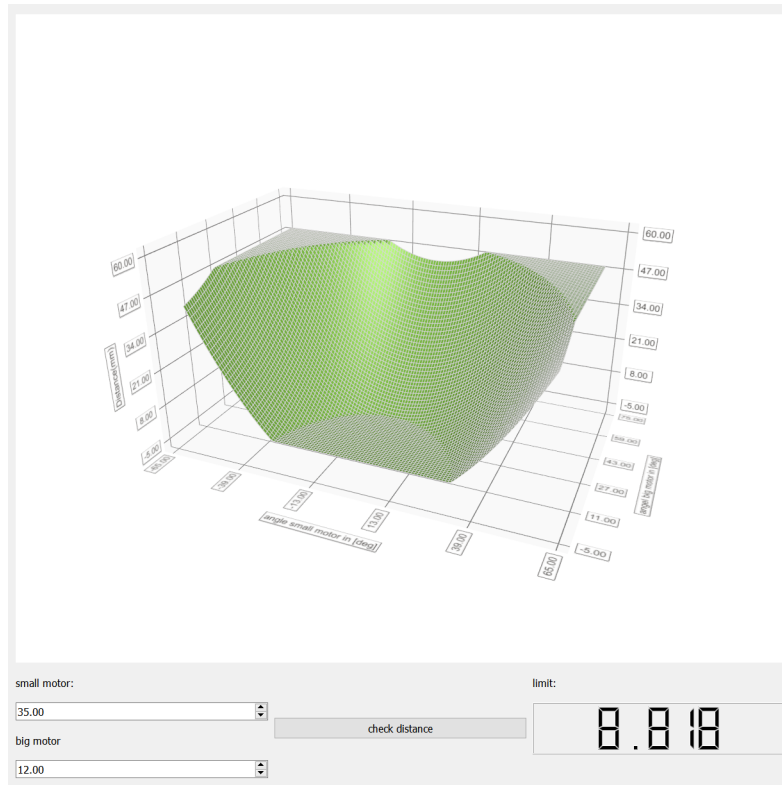


Abbildung 17: Drittes Unterfenster, welches mittels des Buttons 'borders' auf dem Hauptfenster des Steuerungsprogramms aufgerufen werden kann. Das Fenster kann grob in zwei Abschnitte unterteilt werden, der 3D Grafik und der Grenzausgabe. Die 3D Grafik zeigt ein dreidimensionales Abbild der Grenzen. Im Teil des Fensters unter dieser Grafik kann zu beliebigen Winkeln des kleinen und großen Motors die minimale mögliche Distanz zwischen Magnetkugel und Diamanten berechnet und ausgegeben werden.

Für das Erstellen des Fensters wurden zunächst die Grenzen, bei welchen es zu einer Kollision zwischen Magnet und Probe kommen würde, zu bestimmten Winkeln gemessen. Dazu wurde der Abstand des Distanzmotors in 2 mm Schritten verändert und der dazugehörige maximal, sowie minimal mögliche Winkel des kleinen Motors notiert. Nachdem alle Distanzen abgefahren wurden, wurde der Winkel des großen Motors um 2.5° verstellt und ein weiteres Mal die Grenzen abgefahren. Dies wurde solange wiederholt, bis der Winkel des großen Motors, bei einem voll ausgefahrenen Distanzmotor, mit dem bestehenden Setup kollidieren würde. An diese Werte wurde dann ein Paraboloid angepasst. Mittels dieser Funktion kann dann eine Fehlermeldung ausgegeben werden, wenn die eingegebene Position zu einer Kollision führen würde.

4.4 Magnetfeldbestimmung

Der wichtigste Teil des Magnetpositionierungssystems ist der Magnet. Dieses Bauteil beeinflusst im späteren Verlauf die NV-Zentren. Zunächst wird dazu dessen Einfluss auf den Diamanten und somit die Stärke des Magnetfeldes zu unterschiedlichen Abständen bestimmt. Dazu wurde ein Magnetsensor der Firma Infineon genutzt. Bei dem Magnetsensor handelt es sich um einen 3D Magnetic Sensor 2 Go evaluation kit, welcher in der Lage ist, das Magnetfeld in 3 Raumdimensionen zu messen. Zunächst wurde der Magnetsensor auf einer Platte befestigt, sodass keine Translation in x-, y- oder z-Richtung stattfinden kann. Die Platte wurde dabei in eine Höhe gebracht, bei der der Abstand zwischen Magnetsensor und Kugelmagnet, bei voll ausgefahrenem Distanzmotor, möglichst gering ist. Die Winkel der Motoren stehen dabei bei $\theta_B = 0^\circ$ und $\theta_S = 0^\circ$, sodass die Magnetfeldachse senkrecht auf den Magnetsensor fällt. Dadurch wurde erreicht, dass das Magnetfeld ausschließlich in der B_z -Komponente des Magnetsensors lag. Wie in Abbildung 18 zu sehen, ist besitzt die B_x - und B_y -Komponente trotzdem einen Wert ungleich Null, jedoch ist dieser im Vergleich zu B_z verschwindend gering. Gemessen wird die x-, y- und z-Komponente des Magnetfeldes. Durch Aufnahme der x- und y-Komponente kann im späteren Verlauf geprüft werden, ob die Kalibrierung durch den anderen Magneten erfolgreich war, da dieser dann ebenfalls mit der z-Komponente abfallen müsste. Nachdem die Position eingestellt ist, wurden mittels des Programms 41 Messungen zu 1.25 mm Abständen zwischen 0 mm und 50 mm durchgeführt. Es wurden 200 Werte pro Position aufgenommen.

Um die Abhängigkeit zwischen Distanz und Magnetfeldstärke zu bestimmen, wird aus den 200 aufgenommenen Werten zunächst der Mittelwert gebildet und dessen Fehler bestimmt. Der Fehler des 3D Magnetsensors lässt sich durch den Hersteller mit 1 mT angeben[29]. Zusätzlich zum Messwerkzeug besteht ebenfalls ein Fehler auf Grund der ungenauen Positionierung, welcher auf 1 mT abgeschätzt wurde.

Um die magnetische Flussdichte gegen die Distanz aufzutragen, muss zusätzlich zur durch den Motor gesteuerten Distanz der Abstand zwischen Magnetoberfläche und Sensor bei einem Motorwert von 0 mm bestimmt werden. Diese wurde mittels eines Messschiebers gemessen und beträgt (5.5 ± 0.5) mm. Dieser muss dann bei jeder Messung hinzuaddiert werden.

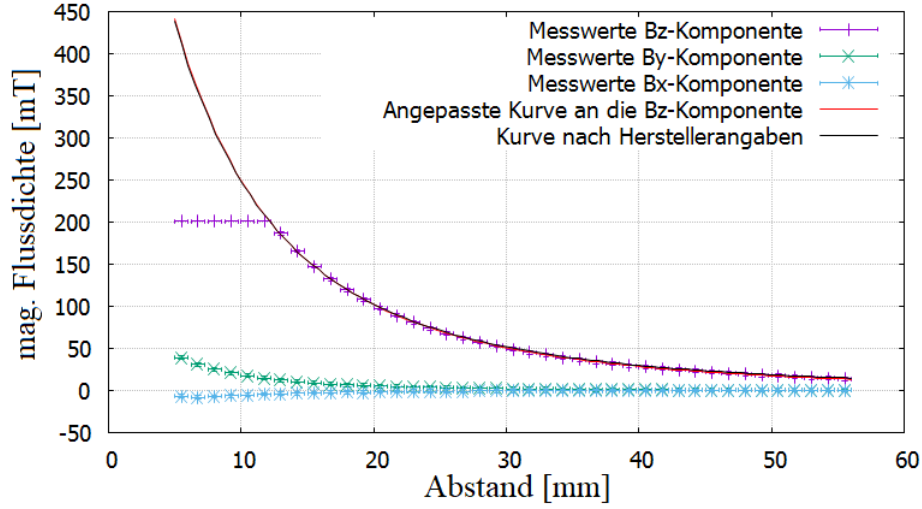


Abbildung 18: Messwerte der magnetischen Flussdichte aufgeteilt in die B_x -, B_y - und B_z -Komponente (blau, grün und violett). An die Messwerte zur B_z -Komponente wurde eine Kurve angepasst (rot), um die magnetische Flussdichte der Oberfläche für jeden Punkt zu erhalten. Die schwarze Kurve beschreibt die magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Distanz nach Herstellerangaben (Einen Durchmesser von 1.5 Zoll und eine Remanenz von 1320 mT)[27].

Um die magnetische Flussdichte in Abhängigkeit des Abstandes zu bestimmen, wird an die B_z -Komponente eine Funktion angepasst. Dabei werden die B_x - und B_y -Komponenten nicht betrachtet, da wie in den Grundlagen beschrieben, hauptsächlich nur der Anteil der magnetischen Flussdichte, welcher parallel zur NV-Achse liegt, die ODMR-Spektroskopie beeinflusst.

Die magnetische Flussdichte eines Kugelmagneten in Abhängigkeit des Abstandes zur Kugeloberfläche kann durch folgende Funktion beschrieben werden[28]:

$$B(x) = B_R \frac{2}{3} \frac{R^3}{(R + x)^3}.$$

Dabei entspricht R dem Radius des Kugelmagneten und B_R der Remanenz. Der Radius ist dabei vom Hersteller mit 1.5 Zoll angegeben, was einer metrischen Größe von ≈ 38.1 mm entspricht. Dieser wird bei der Anpassung der Kurve als konstant angesehen, da er den Herstellerangaben entspricht. Der erste Teil der Gleichung beschreibt die magnetische Flussdichte auf der Oberfläche des Kugelmagneten, der nach Herstellerangaben bei 8815 Gauss liegt. Die Remanenz beträgt 13 200 Gauss. Einsetzen der Parameter liefert die Kurve der magnetischen Flussdichte des Herstellers (schwarze Kurve in Abbildung 18).

Um die Konstanten für die B_z -Komponente zu erhalten, wird eine Funktion der folgenden Form an die Messwerte angepasst:

$$B(d) = A \frac{19.05 \text{ mm}^3}{(19.05 \text{ mm} + d)^3} + B_0.$$

Die Parameter A und B besitzen die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} A &= (889 \pm 2) \text{ mT}, \\ B_0 &= -(1.6 \pm 0.1) \text{ mT}. \end{aligned}$$

Daraus folgt für die experimentell bestimmte Remanenz ein Wert von (1333 ± 3) mT. Aus diesen Parametern kann unter bekanntem Abstand zwischen dem voll ausgefahrenen Distanzmotor und dem Diamanten eine Funktion in der GUI geschrieben werden, welche die theoretische magnetische Flussdichte ausgibt. Zusätzlich kann dadurch auch theoretisch eine bestimmte Magnetfeldstärke angefahren werden, ohne den Abstand zu kennen.

5 Detektion eines NV-Zentrums

Um das Magnetpositionierungssystem an einem NV-Zentrum zu testen und dessen Einfluss zu beobachten, muss zunächst ein NV-Zentrum detektiert werden. Wie bereits in den Grundlagen beschrieben, wird hierbei die Konfokalmikroskopie genutzt. Ein Nachteil dabei ist, dass nicht eindeutig gezeigt werden kann, ob es sich bei dem Anstieg der Zählrate um ein NV-Zentrum oder Schmutz handelt. Zusätzlich muss daher ein ODMR-Spektrum aufgenommen werden. Bei einem Rückgang im Frequenzspektrum bei einer Frequenz von 2.87 GHz, ohne ein äußeres Magnetfeld, handelt es sich um ein NV-Zentrum.

5.1 Detektion einer Fehlstelle durch Konfokalmikroskopie

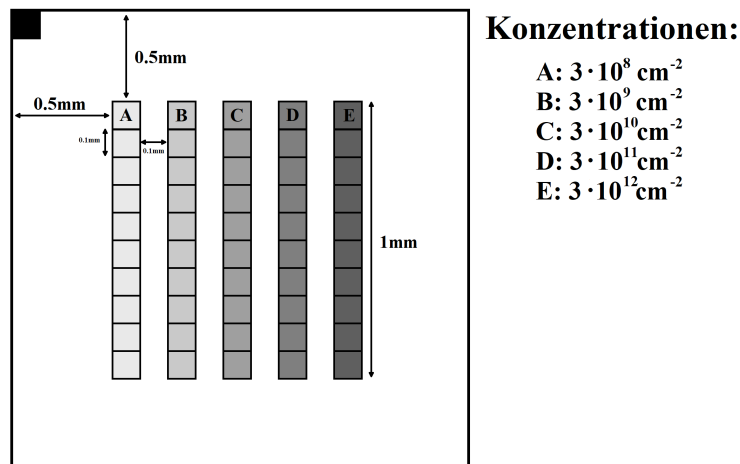


Abbildung 19: Implementationskarte des Diamanten, welcher für die Experimente verwendet wird.

Der Aufbau und die Funktionsweise des Konfokalmikroskops wurden bereits in Kapitel 2.2.1 und 3.1 erläutert. Der für das Experiment genutzte Diamant wurde in Leipzig hergestellt. Er weist, wie in Abbildung 19 gezeigt, fünf Linien auf, die mit den Buchstaben A bis E gekennzeichnet wurden. Linie E besitzt dabei die höchste Konzentration und Linie A die schwächste. Im Folgenden wird mit einem NV-Zentrum auf der Linie A experimentiert.

Um ein NV-Zentrum zu detektieren muss die Position der Linie zunächst ermittelt werden. Ist diese gefunden kann damit angefangen werden einen Scan aufzunehmen. Um einen maximalen Kontrast zu erhalten, kann vorher 'gebleecht' werden. Wie in den Grundlagen erläutert, bedeutet dies, den Laser bei maximaler Leistung auf einen bestimmten Punkt zu fokussieren. Die folgende Abbildung 20 zeigt eine solche Aufnahme.

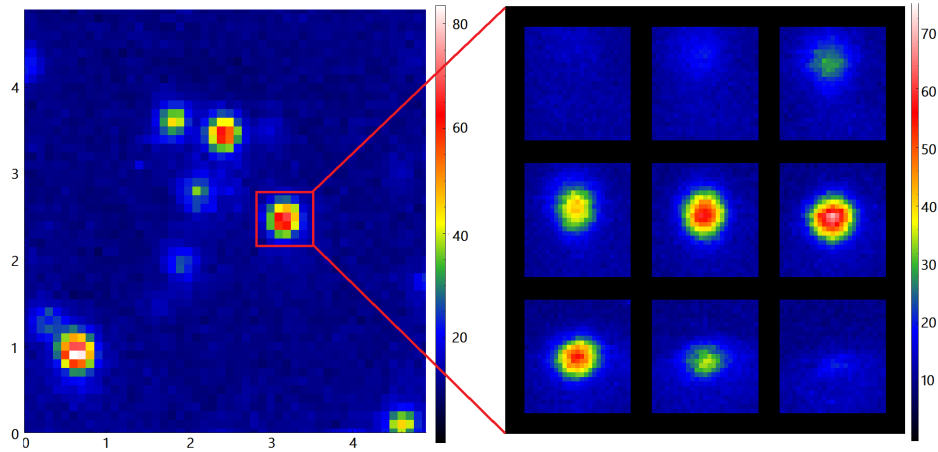


Abbildung 20: Konfokalmikroskopie eines $5\,\mu\text{m} \times 5\,\mu\text{m}$ großen Abschnitts (links). Höhenscan von dem rot umrandeten NV-Zentrum in der Mitte des $5\,\mu\text{m} \times 5\,\mu\text{m}$ -Scans (rechts).

In Abbildung 20 (links) ist ein $5\,\mu\text{m} \times 5\,\mu\text{m}$ Scan mit einer Auflösung von $100\,\text{nm}$ gezeigt. Um den Fokus auf ein NV-Zentrum zu optimieren, kann zusätzlich zur Verkleinerung der Auflösung ein Höhenscan durchgeführt werden. Dieser bildet die gleiche Stelle in unterschiedlichen Höhen ab (Abbildung 20 rechts). Dabei wurde ein Abstand von $25\,\text{nm}$ zwischen den Pixeln und eine Differenz von $150\,\text{nm}$ zwischen den verschiedenen Aufnahmen genutzt.

5.2 Aufnahme eines NV-Zentrums durch ODMR

Um zusätzlich sicher zu gehen, dass es sich bei der Konfokalmikroskopieaufnahme um eine NV-Fehlstelle im Diamanten handelt, wird über den Golddraht Mikrowellenstrahlung eingestrahlt. Diese wird mittels eines AWG erzeugt. Zu beachten ist dabei, dass die Entfernung zwischen Golddraht und NV-Zentrum nicht zu groß ist ($\approx 30\,\mu\text{m}$).

Während der Messung wird dann der angegebene Frequenzbereich abgefahren. Dazu muss zusätzlich zu den Grenzfrequenzen auch der Abstand zwischen den einzelnen Schritten angegeben werden. Dieser beträgt in Abbildung 21 $1\,\text{MHz}$. Das zu messende Intervall wird so gewählt, dass die Nullfeldaufspaltung die Mitte bildet. Das würde einem theoretischen Mittelpunkt von $2.87\,\text{GHz}$ entsprechen. In der folgenden Abbildung 21 wurde ein Intervall von $[2700\,\text{MHz}, 3000\,\text{MHz}]$ zum Messen gewählt.

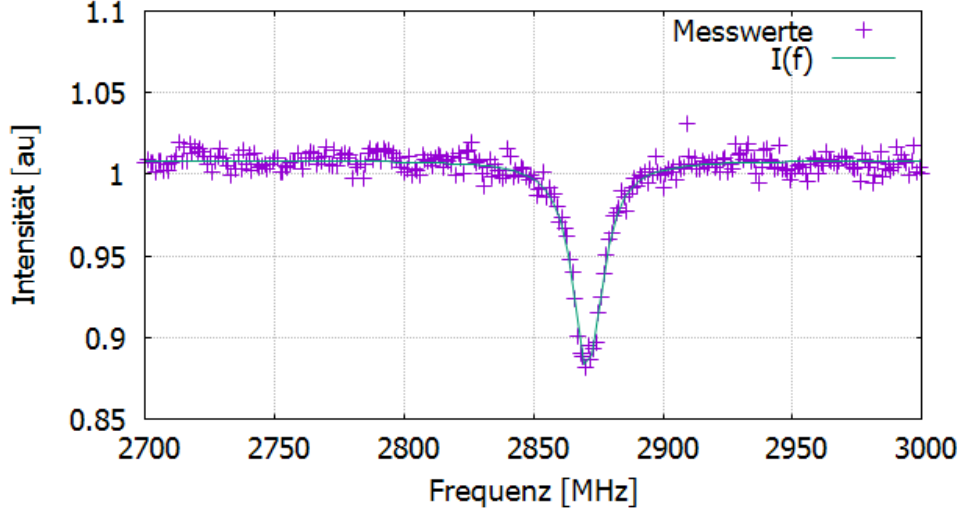


Abbildung 21: ODMR-Spektrum der Nullfeldaufspaltung. Die Messung zeigt das Spektrum von 2700 MHz bis 3000 MHz mit einem normierten Intensitätsrückgang bei 2870 MHz.

Die in Abbildung 21 gezeigten Messwerte wurden dabei bereits normiert, um den prozentualen Rückgang sichtbar zu machen. Zusätzlich wurde eine Lorentzfunktion der folgenden Form angepasst:

$$L(\nu) = A_0 \frac{\nu_h^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \nu_h^2} + C.$$

Dabei entspricht A_0 der Diptiefe, ν_0 der Position des Dips, ν_h der halben Halbwertsbreite und C dem Offset. Für die Messwerte aus Abbildung 21 ergeben sich somit die folgenden Parameter:

$$\begin{aligned} A_0 &= (0.29 \pm 0.01) \text{ au} \\ \nu_0 &= (2871.28 \pm 0.26) \text{ MHz} \\ \nu_h &= (15.2 \pm 0.5) \text{ MHz} \\ C &= (1.04 \pm 0.01) \text{ au.} \end{aligned}$$

Aufgrund des Dips bei $\nu_0 = (2871.28 \pm 0.26) \text{ MHz}$ lässt sich darauf schließen, dass es sich bei der detektierten Stelle um ein NV-Zentrum handelt, sodass die Abhängigkeit zum Magnetfeld beobachtet werden kann.

5.3 ODMR-Spektrum zu verschiedenen Magnetfeldstärken

Da bekannt ist, dass es sich bei der detektierten Stelle um ein NV-Zentrum handelt, kann in diesem Unterkapitel der Einfluss durch das Magnetfeld auf das Zentrum bestimmt werden. Dazu wird der Permanentmagnet angebracht und auf einen Abstand von 50 mm heran gefahren. Dann wird ein ODMR-Spektrum aufgenommen. Die Messwerte sind in der folgenden Abbildung 22 gezeigt.

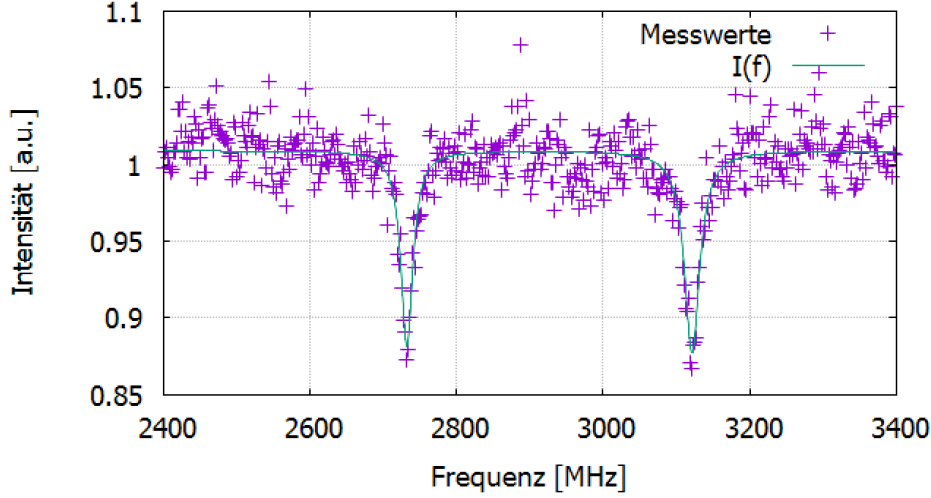


Abbildung 22: ODMR-Spektrum bei einem vertikal angelegten Magnetfeld von 14.83 mT auf der Diamantoberfläche. Die Messung zeigt das Spektrum von 2400 MHz bis 3400 MHz in 2 MHz Schritten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass das äußere Magnetfeld eine Spaltung des Dips verursacht. Die Positionen der niedrigeren und höheren Dips können mittels Anpassen einer Doppellorentzfunktion ermittelt werden. Diese betragen $\nu_1 = (2732.4 \pm 0.7)$ MHz und $\nu_2 = (3121.7 \pm 0.7)$ MHz.

Über Gleichung 9 und Gleichung 10 kann aus den zuvor bestimmten Dip-Positionen die magnetische Flussdichte und der Winkel bestimmt werden. Für die magnetische Flussdichte ergibt sich ein Wert von $B = (13.75 \pm 0.11)$ mT und einen Winkel von $\theta = (59.56 \pm 0.01)^\circ$. Der Winkel sowohl des großen, als auch des kleinen Motors betrug bei dieser Messung 0° . Es wurde nun versucht, die Motoren so zu verstellen, dass der Winkel zwischen NV-Achse und Magnetfeldachse möglichst klein ist. Da nur vier verschiedene Ausrichtungsmöglichkeiten im Diamant existieren und bekannt ist, wie der Diamant in der PCB liegt, konnte vorab die ungefähre Position abgeschätzt werden. Nach mehreren ODMR-Messungen konnte ein Winkel von $2.17 \pm 0.02^\circ$ eingestellt werden. Bei diesen Winkeln wird die Distanz zwischen Magnet und Diamant variiert. Zu den einzelnen ODMR-Messungen wird die theoretische Magnetfeldstärke zum Vergleichen notiert. Zu jeder Messung wurde mittels einer angepassten Doppellorentzfunktion die Positionen der Dips bestimmt. Die dazugehörigen Diagramme sind im Anhang in Abbildung 25 bis 28 gezeigt. Mittels der Positionen der Dips kann das Magnetfeld, sowie der Winkel bestimmt werden. Um die Abhängigkeit zwischen dem ODMR-Spektrum und dem angelegten äußeren Magnetfeld zu bestimmen, wird die Frequenzposition der Dips gegen das Magnetfeld aufgetragen. Die Beziehung ist in der folgenden Abbildung 23 gezeigt.

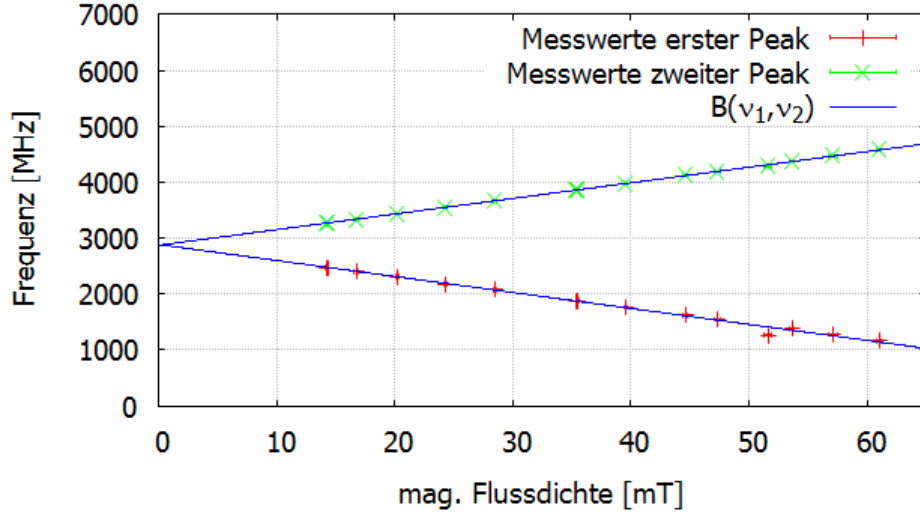


Abbildung 23: Abhängigkeit zwischen den Frequenzen der Dips und dem magnetischen Feld. Dabei wurde sowohl der erste als auch der zweite Dip gezeigt. Der Nullpunkt wird durch die Nullfeldaufspaltung gebildet und liegt somit bei $\nu_0 \approx 2870$ MHz.

Das Diagramm zeigt 13 Messwerte für beide Dips. Je größer das äußere angelegte Magnetfeld ist, desto größer ist der Abstand zwischen dem ersten und zweiten Dip. Dieser liegt bei der letzten Messung bei $\nu_1 = (1167.2 \pm 1.5)$ MHz und $\nu_2 = (4579.5 \pm 1.7)$ MHz. Dabei ist zu erkennen, dass die Dips sich nicht gleichmäßig von der Nullfeldaufspaltung entfernen. Für den ersten Dip ergibt sich eine Differenz von $\Delta\nu_1 = (1702.8 \pm 1.5)$ MHz und für den zweiten Dip eine Differenz von $\Delta\nu_2 = (1709.5 \pm 1.7)$ MHz. Wenn $\Delta\nu_1$ und $\Delta\nu_2$ identisch wären, dann würde Gleichung 10 immer einen Winkel von 0° betragen. In diesem Fall ergibt sich für die kleinste Winkelabweichung ein Wert von $(2.17 \pm 0.02)^\circ$ und für die größte ein Wert von $(6.10 \pm 0.07)^\circ$. Die Abweichung zwischen dem Winkel der ersten Messung $(8.27 \pm 0.05)^\circ$ und dem Winkel der letzten Messung beträgt $(6.10 \pm 0.07)^\circ$ und lässt sich über eine Ungenauigkeit in der Justage erklären.

In Abbildung 23 wird dabei nur auf die Magnetfeldbestimmung mittels der NV-Zentren eingegangen. Zusätzlich dazu wurde zu jeder Messung ebenfalls der theoretische Messwert notiert, welcher über das Programm angegeben wird. In Abbildung 24 werden diese miteinander verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass mit steigender magnetischer Flussdichte die Differenz zwischen dem theoretisch berechneten Wert und dem über das NV-Zentrum gemessenen Wert steigt. Dies lässt ebenfalls auf eine etwas ungenaue Positionierung schließen.

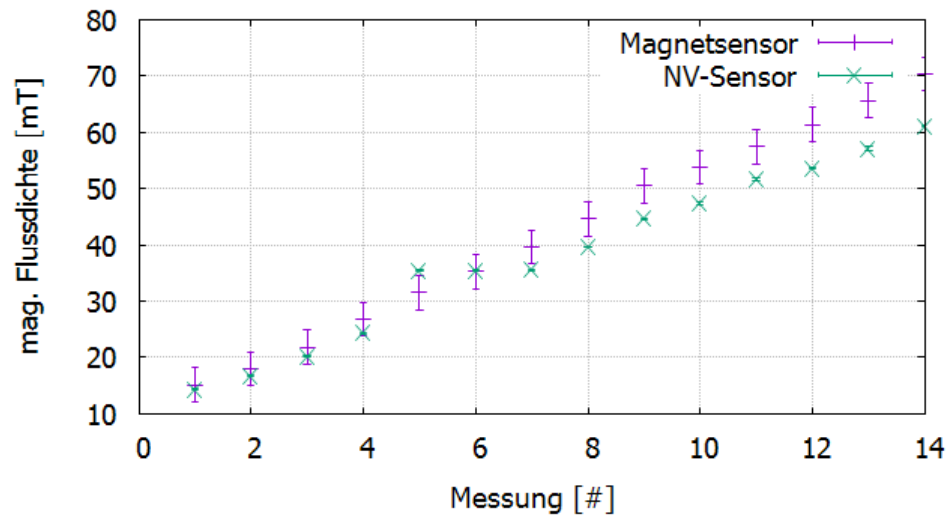


Abbildung 24: Nach dem Programm theoretisch berechnete Werte sowie die dazu-gehörigen über das NV-Zentrum gemessenen Werte zu den jeweiligen Messungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Konstruktion des Magnetpositionierungssystems

Der Hauptteil dieser Bachelorarbeit bestand darin, das Magnetpositionierungssystem zu designen, zu bauen und zu programmieren. Dieses besteht im wesentlichen aus vier Teilen, die durch drei Motoren verbunden sind. Mit Hilfe des Steuerungsprogramms kann dieser so gesteuert werden, dass drei der möglichen vier Ausrichtungen der NV-Achsen anfahrbar sind. Mittels eines Magnetsensors wurde zu verschiedenen Abständen das Magnetfeld bestimmt, um die Kalibrierung sowie die Herstellerangaben zu überprüfen. Die Messungen der B_x -, B_y - und B_z -Komponenten des magnetischen Flusses zu verschiedenen Abständen zeigte dabei, dass die gemessenen Ausrichtungswerte den Herstellerangaben gleichen.

Das Magnetpositionierungssystem besitzt dabei eine theoretische Arbeitsweite von 14.87 mT bis zu 571.67 mT je nach Winkелеinstellung. Da jedoch die NV-Zentren nur bestimmte Ausrichtungen im Diamanten annehmen können liegt der tatsächliche Arbeitsbereich nur zwischen 14.87 mT und ca. 70 mT. Zusätzlich ist zu beachten, dass auf Grund des Gewichtes bei der Positionierung des Magnetpositionierungssystems nur im cm-Bereich genau gearbeitet werden konnte, weshalb auch die Winkeldifferenz bei unterschiedlichen angelegten Magnetfeldern aus Abbildung 24 erklärt werden kann.

6.2 Vergleich der äußeren Magnetfelder

Da das NV-Zentrum auch als Magnetsensor genutzt werden kann, konnte hiermit ebenfalls die Magnetfeldstärke bestimmt werden. Dies wurde mittels ODMR-Spektroskopie und den in den Grundlagen erwähnten Formeln durchgeführt.

Es wurde zunächst nach einem NV-Zentrum gesucht, bei welchem die Achse des NV-Zentrums und die Richtung des Magnetfeldes, mittels des Magnetpositionierungssystems in Übereinstimmung gebracht werden konnte. Die Ausrichtung des Magnetfeldes wurde mit mehreren ODMR-Spektren optimiert. Auf Grund dessen, dass die möglichen Ausrichtungen der NV-Zentren bekannt sind, war dies mittels weniger Messungen möglich. Nachdem mit der ODMR-Spektroskopie die Magnetfeldstärke über die Position der Dips bestimmt wurde (Abbildung 25 bis 28), können diese mit der dazu notierten Magnetfeldstärke von dem Magnetpositionierungssystem verglichen werden. Die Werte der 13 Messungen sind dabei in Abbildung 24 dargestellt. Bei direktem Vergleich zwischen dem gemessenen und bestimmten äußeren Magnetfeld zeigt sich, dass für höhere Werte des Magnetfeldes eine größere Differenz besteht.

6.3 Ausblick

Als nächster Schritt wurde die Rabi-Oszillation gemessen, welche in einer Masterarbeit genauer beschrieben wurde[26]. Zusätzlich zur Rabi-Oszillation kann durch pulsed-ODMR-Spektroskopie der Kernspin des NV-Zentrums sichtbar gemacht werden. Daraus kann beispielsweise eine Aussage über das Isotop des Stickstoffatoms getroffen werden, oder ob sich ein ^{13}C in unmittelbarer Nähe befindet und wie weit dieses dann vom NV-Zentrum entfernt ist.

In weiterer Planung ist eine Erweiterung des bereits bestehenden Aufbaus mit einer zusätzlichen APD, um Korrelationsmessungen durchzuführen. Ebenfalls ist geplant die Relaxationszeiten T_1 und T_2 zu messen, sowie *Composite Pulses* durchzuführen.

Ein weiteres Ziel ist, dass zusätzlich zu der Manipulation der Energieniveaus auch die Lebensdauer eines Quantenzustandes manipuliert werden soll. Dazu werden Mikrowellenpulse genutzt.

Literatur

- [1] M. Homeister (2013). Quantum Computing verstehen (3. Auflage). Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg.
- [2] M. Born: Physik im Wandel meiner Zeit (3. Auflage). Braunschweig, Deutschland: Vieweg & Sohn.
- [3] J. Lich: Festkörperbasierte Einzelphotonenquelle in Diamant. Fakultät für Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität, München, Mai 2008.
- [4] K. Beha: Einzelne Farbzentren in Diamant: Grundlegende physikalische Eigenschaften, Nanophotonik und Quantenoptik. Mathematische-Naturwissenschaftliche Sektion Fachbereich Physik an der Universität Konstanz, September 2012.
- [5] M. W. Doherty; N. B. Manson; P. Delaney; F. Jelezko; J. Wachtrup; L. C. L. Hollenberg: The nitrogen-vacancy colour centre in diamond in Physics Reports Vol 528, Juli 2013, Seite 1-45.
- [6] C. J. R. Sheppard, D. M. Shotton: Confocal (1997): Laser Scanning Microscopy in Royal Microscopical Society Microscopy Handbooks. Band 38. BIOS Scientific Publishers Limited, Oxford, UK 1997
- [7] D. J. Willock(2009). Molecular Symmetry. Chichester, Verinigtes Königreich
- [8] J. Verst: Aufbau eines Messplatzes zur optischen Detektion magnetischer Resonanz und Manipulation von NV-Zentren. Institut für Physik an der Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, September 2014.
- [9] F. Münzheimer: Magnetometrie mit Diamant: Entwicklung eines Rastersondenmagnetometers unter Verwendung eines Ensembles von Stickstoff-Fehlstellen-Zentren im Diamantkristall als Messsonde. Institut für Physik Julius-Maximilians-Universität, Würzburg, 2015
- [10] I. V. Fedotov; L. V. Doronina-Amitonova; A. A. Voronin; A. O. Levchenko; S. A. Zibrov; D. A. Sidorov-Biryukov; A. B. Fedotov; V. L. Velichansky; A. M. Zheltikov: Electron spin manipulation and readout through an optical fibre in Scientific Reports 201407.
- [11] R. Harris (2013). Moderne Physik (2. Auflage). München, Deutschland: Pearson Deutschland GmbH.
- [12] H. J. Kull. (2010). Laserphysik Physikalische Grundlagen des Laserlichts und seine Wechselwirkung mit Materie (1. Auflage). München, Deutschland: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [13] H. J. Metcalf; P. van der Straten. (1999). Laser Cooling and Trapping (1. Auflage). New York, USA: Springer Science+Business Media New York.
- [14] V. Jacques,¹ P. Neumann;[†] J. Beck; M. Markham; D. Twitchen; J. Meijer; F. Kaiser; G. Balasubramanian; F. Jelezko; J. Wrachtrup: Dynamic Polarization of Single Nuclear Spins by Optical Pumping of Nitrogen-Vacancy Color Centers in Diamond at Room Temperature in Physical Review letters Vol. 102, Februar 2009.
- [15] M. O. Scully; M. S. Zubairy. (2008). Quantum Optics (6. Auflage). Cambridge, Großbritannien: Cambridge University Press 1997.

- [16] S. Meister (2009). Bloch sphere. https://www.wikiwand.com/en/Bloch_sphere (Letzter Aufruf 03.02.2020).
- [17] M. A. Nielsen; I. L. Chuang. (2016). Quantum Computation and Quantum Information (3. Auflage). Cambridge, Großbritannien: TJ International Ltd.
- [18] G. Grynberg; A. Aspect; C. Fabre. (2010). Introduction to Quantum Optics from the Semi-classical Approach to Quantized Light (1. Auflage). Cambridge, Großbritannien: Cambridge University Press.
- [19] P. Neumann; J. Beck; M. Steiner; F. Rempp; H. Fedder; P. R. Hemmer; J. Wrachtrup; F. Jelezko: Single-Shot Readout of a Single Nuclear Spin in SCIENCE Vol 329, Juli 2010, Seite 542-544.
- [20] M. Lesik: Engineering of NV color centers in diamond for their applications in quantum information and magnetometry. Université Paris-Sud, Paris, Frankreich, März 2015.
- [21] A. Dréau; P. Spinicelli; J. R. Maze; J.-F. Roch; V. Jacques: Single-shot readout of single nuclear spins in diamond under ambient conditions. Institut Neel, Grenoble Frankreich, November 2012.
- [22] P. Neumann: Towards a room temperature solid state quantum processor — The nitrogen-vacancy center in diamond. Fakultät 8 Mathematik und Physik der Universität Stuttgart, Stuttgart, Dezember 2011.
- [23] P. C. Maurer; G. Kucsko; C. Latta; L. Jiang; N. Y. Yao; S. D. Bennett; F. Pastawski; D. Hunger; N. Chisholm; M. Markham; D. J. Twitchen; J. I. Cirac; M. D. Lukin: Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second in SCIENCE Vol 336, Juni 2012.
- [24] J. Thieme: Aufbau eines Konfokalmikroskops zur Mikrowellen-Kontrolle von Quantenzuständen in Farbzentren. Fakultät der Physik Universität Kassel, Kassel, Oktober 2017
- [25] J. Jacob: Konfokalmikroskopie zur Mikrowellenspektroskopie von Stickstoff-Fehlstellen-Zentren. Fakultät der Physik Universität Kassel, Kassel, Oktober 2018
- [26] J. Thieme: Erweiterung des Farbzentrenaufbaus zur flexiblen Magnetresonanzmessung von Farbzentren. Fakultät der Physik Universität Kassel, Kassel, Dezember 2020
- [27] K&J Magnetics Inc., Sphere Magnet SX8. <https://www.kjmagnetics.com/proddetail.asp?prod=SX8> (Letzter Aufruf 27.05.2020).
- [28] supermagnete. <https://www.supermagnete.de/faq/Wie-berechnet-man-die-magnetische-Flussdichte> (Letzter Aufruf 27.05.2020).
- [29] Infineon. https://www.mouser.de/datasheet/2/196/Infineon-TLV493D-A1B6-DataSheet-v01_10-EN-1227967.pdf (Letzter Aufruf 27.05.2020).

7 Anhang

7.1 ODMR-Spektren zur Magnetfeldaufspaltung

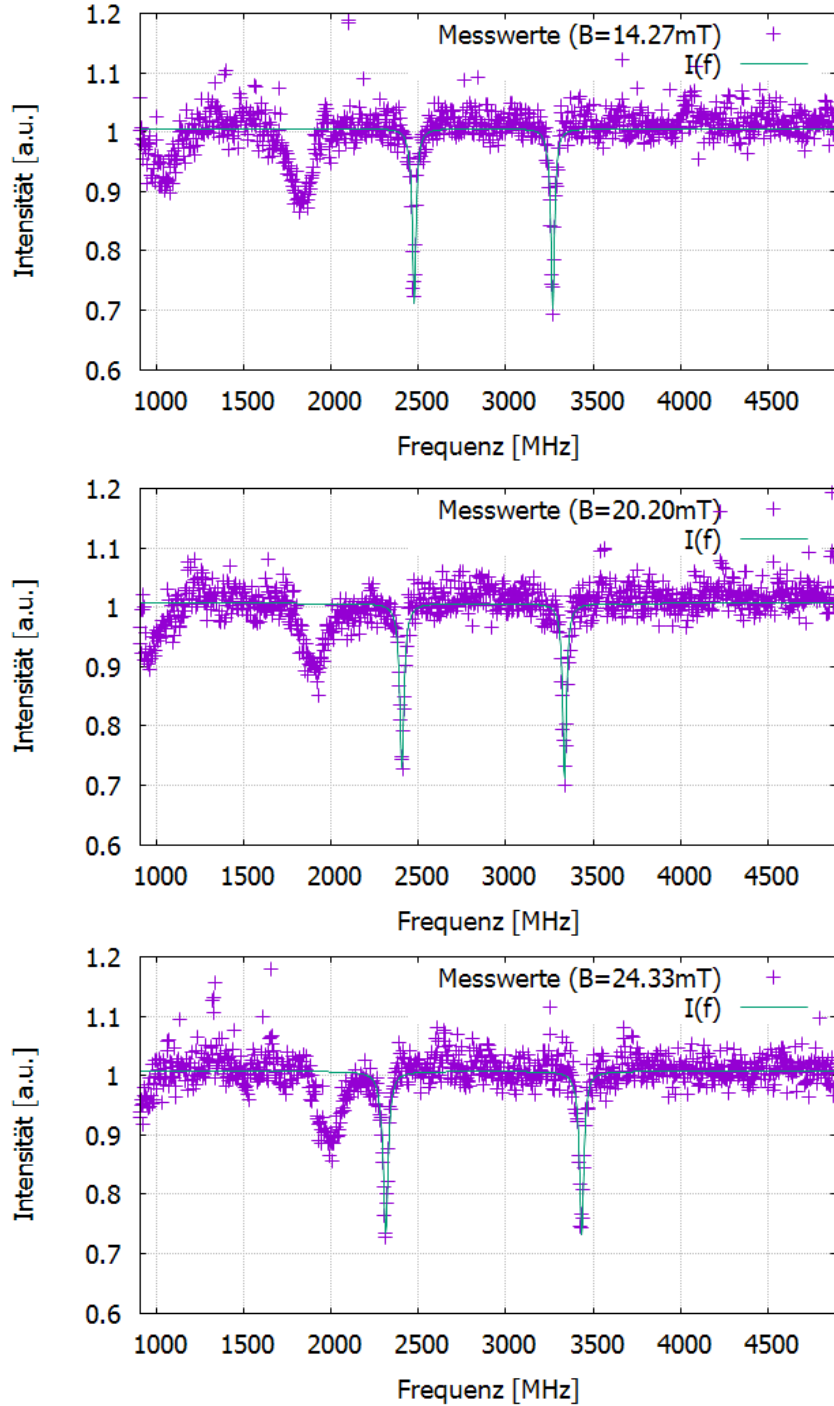


Abbildung 25: Aufspaltung der ± 1 Elektronenspin-Zustände bei verschiedenen äußeren angelegten Magnetfeldstärken.

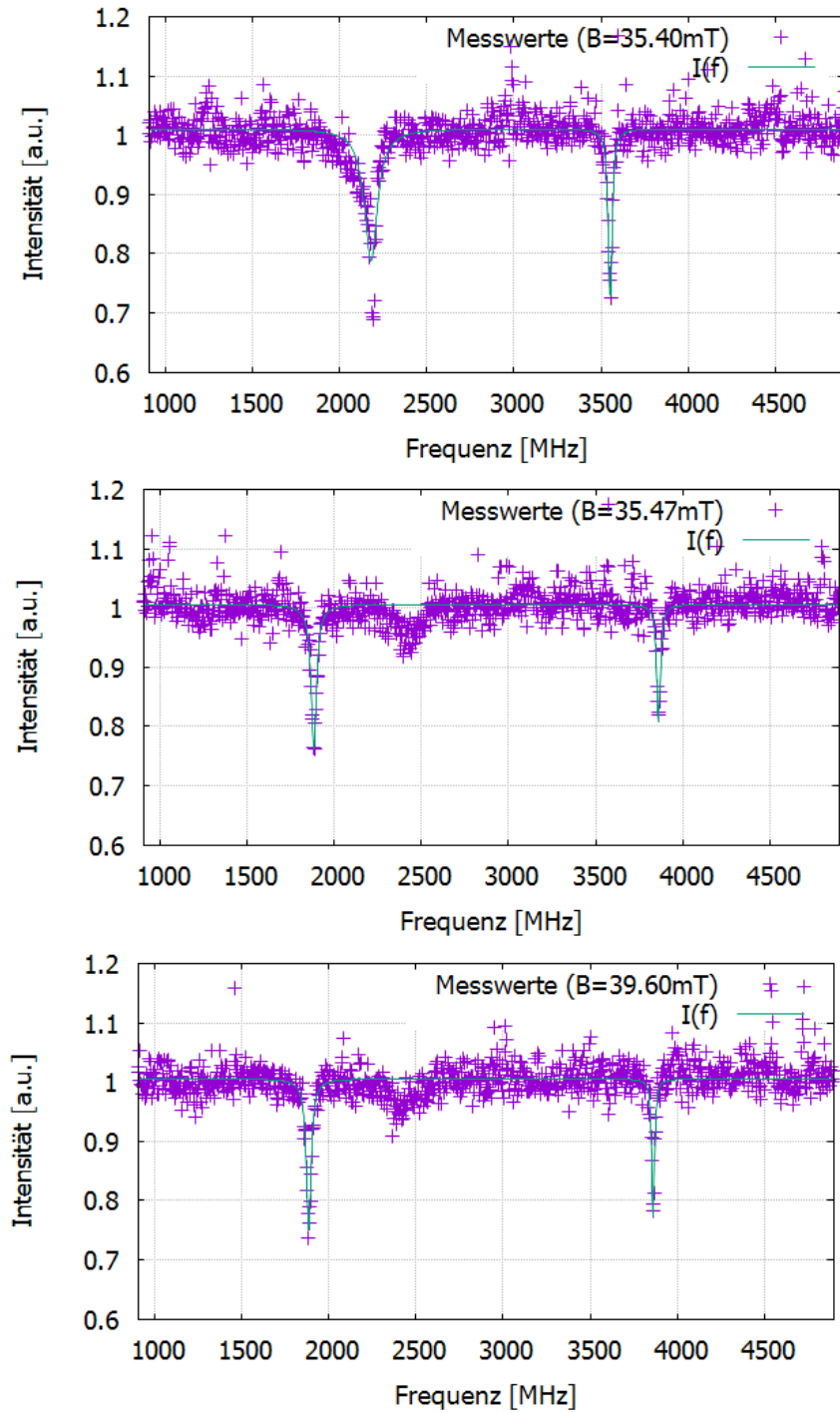


Abbildung 26: Aufspaltung der ± 1 Elektronenspin-Zustände bei verschiedenen äußeren angelegten Magnetfeldstärken.

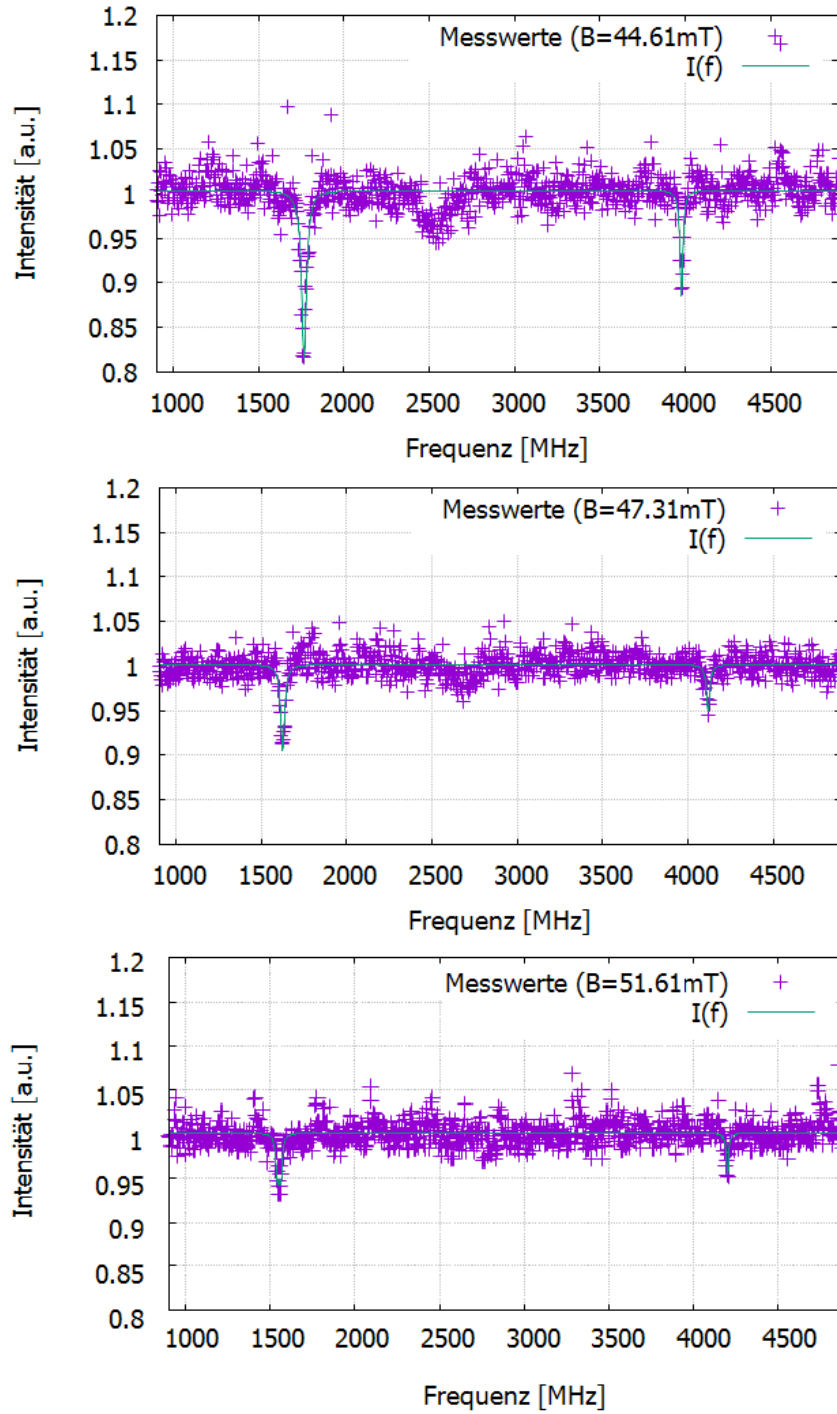


Abbildung 27: Aufspaltung der ± 1 Elektronenspin-Zustände bei verschiedenen äusseren angelegten Magnetfeldstärken.

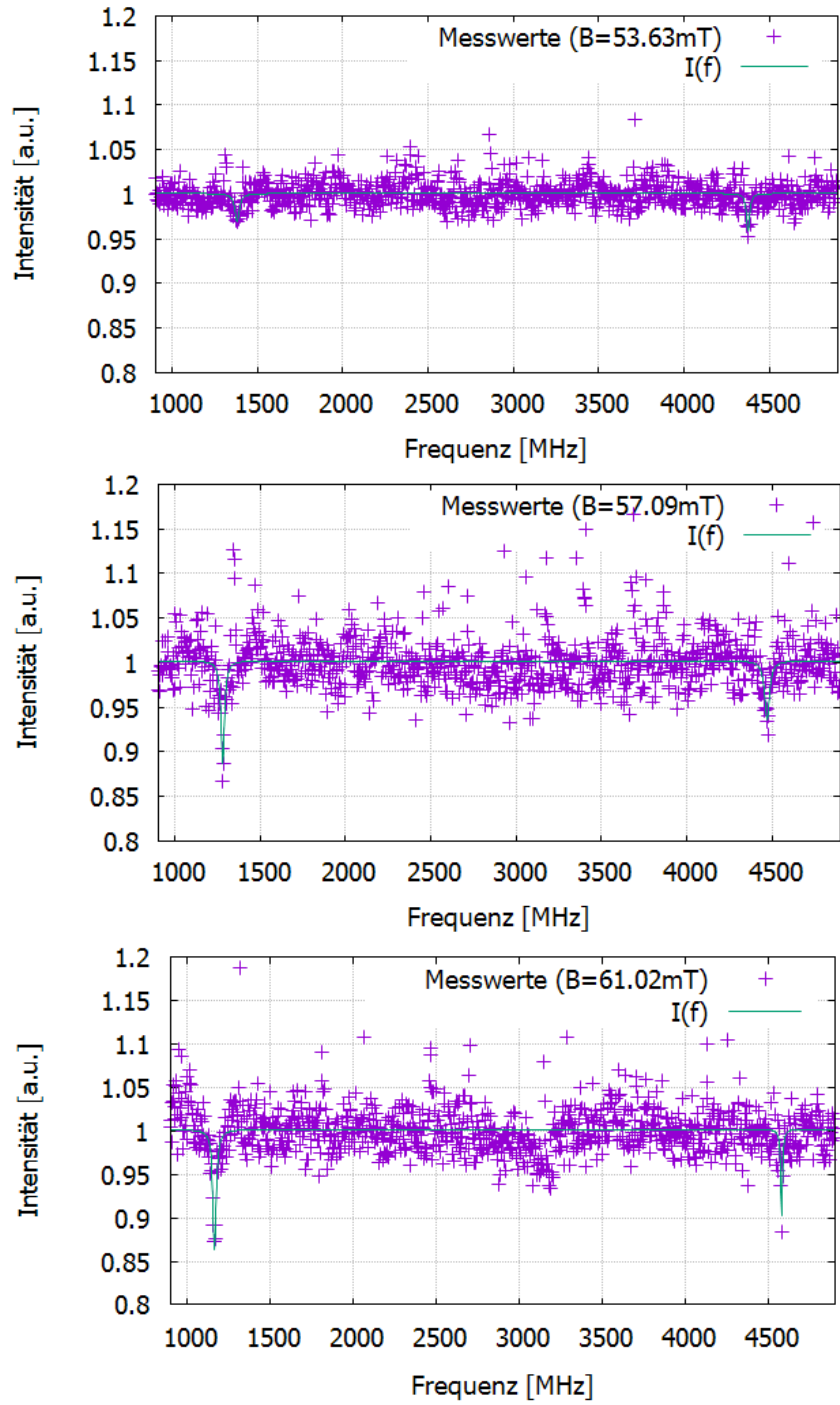


Abbildung 28: Aufspaltung der ± 1 Elektronenspin-Zustände bei verschiedenen äußeren angelegten Magnetfeldstärken.