

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Elektro- und Informationstechnik

Studiengang spezifisches Projekt

von

Sven Deinzer

Magnetfeldmessung mit NV-Zentren

Magnetic Field Measurements with NV Centers

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Elektro- und Informationstechnik

Studiengang spezifisches Projekt

von

Sven Deinzer

Magnetfeldmessung mit NV-Zentren

Magnetic Field Measurements with NV Centers

Bearbeitungszeitraum: von 1. August 2026
 bis 30. September 2026

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Alexander Prinz

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Heiko Zatocil



Studiengang spezifisches Projekt Zusammenfassung

Studentin/Student (Name, Vorname):	Deinzer, Sven
Studiengang:	Elektro- und Informationstechnik
Aufgabensteller, Professor:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Prinz
Ausgabedatum: 1. August 2026	Abgabedatum: 30. September 2026

Titel:

Magnetfeldmessung mit NV-Zentren

Zusammenfassung:

Durch NV-Zentren in Diamanten werden hochsensitive Magnetfeldmessungen ermöglicht und bilden somit die Grundlage der modernen Quantensorik. Seit einigen Jahren unterstützt der deutsche Staat Unternehmen, die die Quantensorik Bildungseinrichtungen näher bringen soll. Dazu gehört auch Qool-Sensing, die ein Sensebox-Kit mit einem NV-Zentrum anbieten. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Inbetriebnahme dieser Sensebox und der Durchführung der beiden zur Verfügung gestellten Experimente zum Quenching und zur optischen Detektion magnetischer Resonanz (ODMR). Außerdem wird an der von Qool-Sensing erstellten Challenge "QOOL Kit DIY Challenge" teilgenommen. Dabei soll ein eigener Versuch zum innovativen Messen mit NV-Zentren erstellt und eingereicht werden. Hierbei wird das konstante Magnetfeld eines Gleichstrommotors mit einem NV-Zentrum vermessen, ausgewertet und anschließend bewertet werden.

Schlüsselwörter: NV-Zentrum, Stickstofffehlstelle, Magnetfeldmessung, ODMR, Quantensensor

Inhaltsverzeichnis

1	Stand der Technik	1
1.1	NV-Zentrum	1
1.2	Energieniveau und Anregung	1
1.3	Spin	3
1.4	Quenching	4
1.5	optische Detektion magnetischer Resonanz (ODMR)	4
1.6	Zeeman-Aufspaltung	8
2	Meilenstein 1: Quenching Experiment	10
2.1	Versuchsaufbau	10
2.2	Programm	14
2.2.1	Zentrale Variablen und OLED	14
2.2.2	Programmzyklus	14
2.2.3	Programm auf senseBox übertragen	15
2.2.4	Eigenschaften und Anpassungen	16
2.3	Funktionsweise	16
2.4	Ergebnisse und Durchführung	19
2.4.1	Durchführung ohne Gehäuse	19
2.4.2	Durchführung mit Gehäuse	20
2.4.3	Abschlussergebnis Versuch Quenching	22
3	Meilenstein 2: ODMR Experiment	23
3.1	Versuchsaufbau	23
3.1.1	Kommunikationsprobleme zwischen der senseBox und dem Mikrowellengenerator	23
3.1.2	Implementierung	24
3.2	Programm	25
3.2.1	Arduino IDE	28
3.2.2	Python	29
3.3	Funktionsweise	33
3.4	Ergebnisse und Durchführung	34
3.4.1	Messung der Nullfeldaufspaltung	34
3.4.2	Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildner	36
4	Meilenstein 3: Magnetfeldmessung an einem Gleichstrommotor	38

4.1	Versuchsentwurf	38
4.2	Befestigung	39
4.2.1	Skizzen	39
4.2.2	Anforderungen und Konstruktion	39
4.2.3	Montage	43
4.3	Versuchsaufbau, Programme und Funktionsweise	48
4.4	Ergebnisse und Durchführung	49
4.4.1	Exemplarische Versuchsdurchführung	49
4.4.2	1. Messreihe	51
4.5	2. Messreihe	55
4.6	Abschlussergebnisse und Fazit	60
Literaturverzeichnis		61
Abbildungsverzeichnis		63
Tabellenverzeichnis		66

Kapitel 1

Stand der Technik

Um die Messungen in den späteren Meilensteinen zu verstehen, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Effekte und Grundlagen erläutert, die im Zusammenhang mit NV-Zentren stehen.

1.1 NV-Zentrum

Ein Diamant besteht primär aus Kohlenstoff. Bringt man ein Stickstoffatom anstelle eines Kohlenstoffatoms ein und befindet sich daneben eine Atomleerstelle (Vakanz), spricht man von dem sogenannten Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum oder auf Englisch von "Nitrogen Vacancy-Center" (siehe Abbildung 1.1). Zusätzlich entstehen durch die Atombindungen unterschiedlich ausgerichtete Achsen [1].

1.2 Energieniveau und Anregung

Nachdem im vorherigen Abschnitt der Aufbau eines NV-Zentrums vorgestellt wurde, stellt sich die Frage, wieso diese für Messungen genutzt werden können.

NV-Zentren besitzen zwei ungepaarte Elektronen, was zu einem Elektronenspin (siehe Kapitel 1.3) $S=1$ und, damit verbunden drei Eigenzuständen führt $m_s = -1, 0, 1$ [7]. Der dazugehörige Grundzustand ^3A (Resonanzfrequenz bei 2,87 GHz) und der angeregte Zustand ^3E (Resonanzfrequenz bei 1,45 GHz) können in ein Singulett $m_s = 0$ und einen Dublett-Zustand $m_s = \pm 1$ geteilt werden. Durch optische Anregung mit beispielsweise einem grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm werden die angeregten Zustände ^3E (siehe Abbildung 1.2) mit Elektronen besetzt [1]. Nach der Anregung ergeben sich zwei Möglichkeiten für die Relaxation. Relaxation beschreibt, wie das NV-Zentrum vom angeregten Zustand wieder in den Grundzustand zurückfällt (Relaxation) [7].

1. Relaxation über den direkten Weg, wodurch ein Photon mit einer Wellenlänge von 637 nm im roten Bereich emittiert wird (siehe Abbildung 1.2) [7].

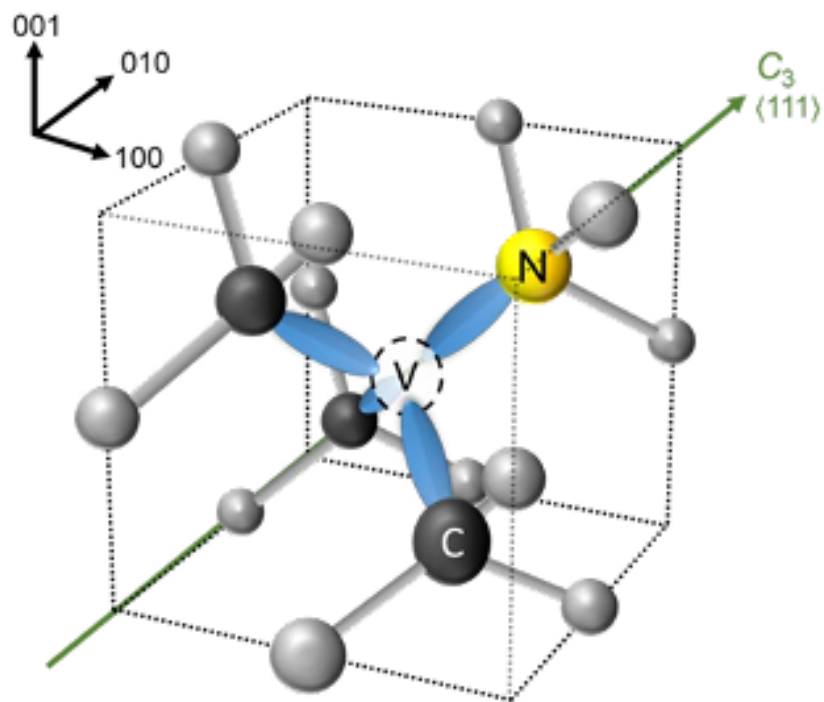


Abbildung 1.1: Modellaufbau eines NV-Zentrums: V = Fehlstelle (gestrichelter Kreis), N = Stickstoffatom (gelb), C = Kohlenstoffatom (grau und schwarz), unterschiedliche Achsen (blau) [1]

2. Indirekte Relaxation über einen Zwischenzustand, wodurch eine nicht sichtbare Wellenlänge emittiert wird (siehe Abbildung 1.2) [7].

Für tiefergehende Informationen ist das Grundlagenwerk "Quantenmechanik 1" von Oliver Tennert zu empfehlen (siehe [9]), bei dem ab Seite 31 der Elektronenspin und die Energieniveaus genauer erklärt werden. Zudem erörtert Mario Bähr in seiner Dissertation [1] ab Seite 11 den Aufbau von NV-Zentren und den Wechsel zwischen den Energieniveaus genauer.

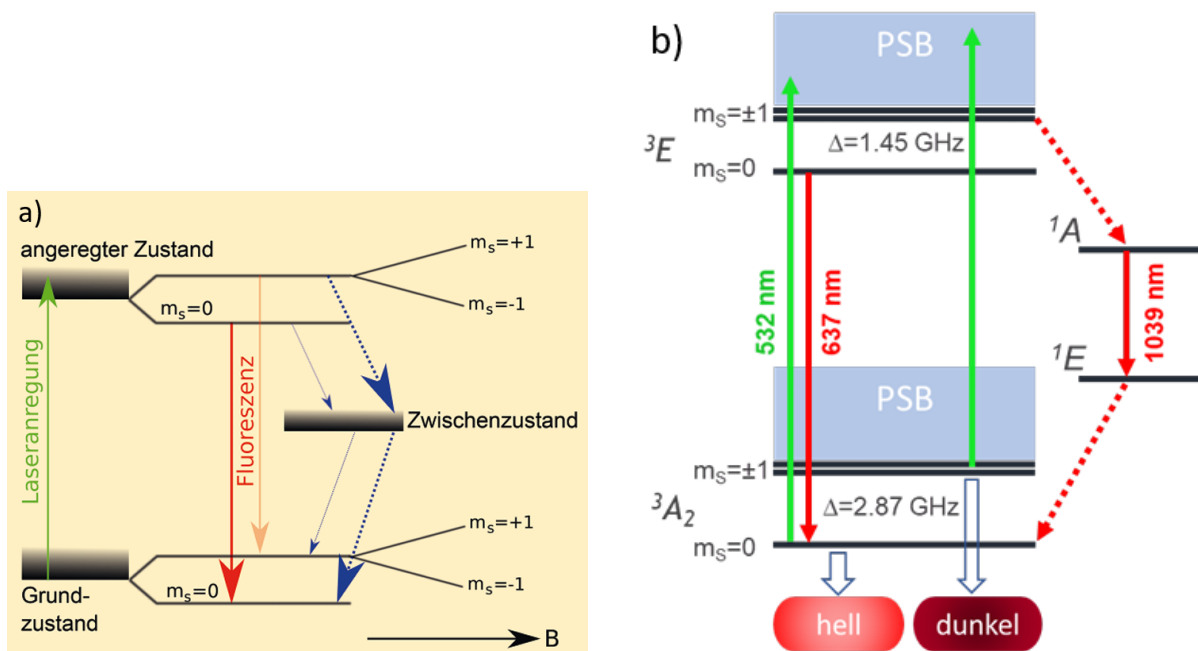


Abbildung 1.2: a) Vereinfachte Darstellung der Energieniveaus [7].

b) Grünener Pfeil: Anregung durch einen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm.

Roter Pfeil (637 nm): direkter Übergang unter Emission von rotem Licht mit einer Wellenlänge von 637 nm.

Roter Pfeil (1039 nm): indirekter Übergang unter Emission von nicht sichtbarem Licht [1].

1.3 Spin

Da es sich beim Spin, worunter auch der zuvor erwähnte Elektronenspin fällt, um eine hochkomplexe quantenmechanische Eigenschaft handelt, wird sich in dieser Arbeit auf eine anschauliche Erklärung der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität beschränkt.

"Spin ist eine gegebene Eigenschaft von Teilchen (Elektronen, Protonen, Neutronen usw.) so wie Masse oder Ladung. Der Spin ist bedeutend für die Struktur von Atomen und Molekülen und bildet die Basis von Magnetismus und von vielen chemischen Phänomenen" [10]. Kleine Teilchen wie Elektronen kann man sich in einem Modell als Kügelchen vorstellen, die sich um ihre eigene Achse mit einem bestimmten Drehimpuls

drehen. Dadurch kann man das Verhalten veranschaulichen, auch wenn der quantenmechanische Spin keine tatsächliche Rotation eines Teilchens beschreibt, sondern eine intrinsische Eigenschaft [10].

1.4 Quenching

In den vorherigen beiden Unterkapiteln wurde erläutert, weshalb ein NV-Zentrum bei Anregung mit grünem Licht rotes Licht emittiert bzw. fluoresziert. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit dem Quenching, einer Möglichkeit, diese Eigenschaft für die Magnetfeldmessung zu nutzen.

Quenching wird auch als Fluoreszenzlöschung bezeichnet und beschreibt die Reduzierung der Fluoreszenz durch äußere Einflüsse. Ein solcher Einfluss kann beispielsweise ein starkes Magnetfeld sein, das senkrecht zur NV-Achse steht.

Wird ein magnetisches Feld angelegt, so ändert sich die Stärke der Fluoreszenz (siehe 1.3), also wie viel rotes Licht vom NV-Zentrum emittiert wird. Ändert sich das Magnetfeld, so ändert sich auch die Menge an ausgestrahltem rotem Licht. Dies bewirkt somit eine Helligkeitsänderung, die z.B. mit einer Fotodiode gemessen und ausgewertet werden kann. Dadurch können im Anschluss auch Rückschlüsse auf das Magnetfeld gezogen werden. Dies wird auch in Meilenstein 1 untersucht [4].

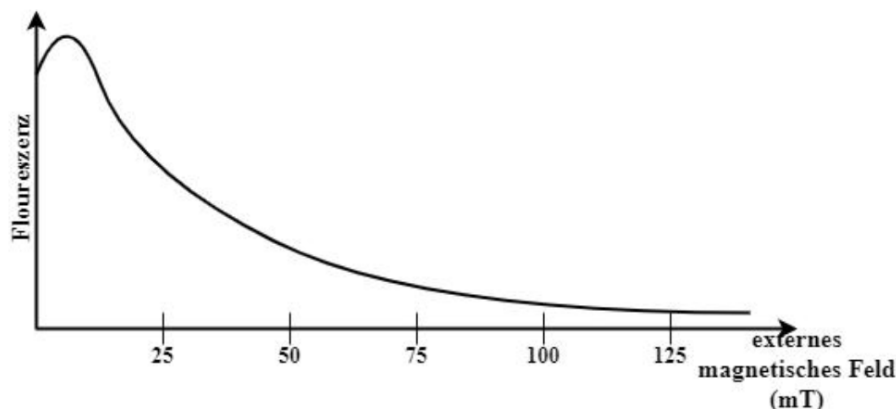


Abbildung 1.3: Kennlinien zur Reduzierung der Fluoreszenz mithilfe eines Magnetfeldes [4]

1.5 optische Detektion magnetischer Resonanz (ODMR)

Neben dem Quenching existiert ODMR als Messverfahren. Dieses Verfahren gilt in der Forschung als Standard und wird in zahlreichen Quellen direkt genannt oder indirekt beschrieben (z.B. in [1], [11] oder [7]). In diesem Abschnitt wird insbesondere auf das Funktionsprinzip, auf die Berechnung der magnetischen Flussdichte und auf die Anwendbarkeit zur Messung von dynamischen Magnetfeldern eingegangen. Dies zusammen bildet die theoretische und mathematische Grundlage zur Durchführung von Meilenstein 2 und der Magnetfeldmessung eines Motors in Meilenstein 3.

Anmerkung

In der Originalquelle [11] wird nicht immer zwischen der Kreisfrequenz ω und der Frequenz f unterschieden (vermutlich da sich 2π oft automatisch herauskürzt). Hierbei geht aus dem Kontext hervor, dass sehr oft $\omega = f$ verwendet wird. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird dies auch hier angewendet (Beispielsweise in Gleichung 1.5).

Formelzeichen und Umrechnung

In diesem Kapitel werden zur Berechnung einige Formeln benötigt. Dieser Abschnitt nennt und bezeichnet alle benötigten physikalischen Größen. Dies beinhaltet auch physikalische Konstanten, die aus der Arbeit von Johannes Verst [11] entnommen wurden. ω_0 Resonanzfrequenz (ablesbar an den Einbrüchen im Fluoreszenzspektrum) γ_e Gyromagnetisches Verhältnis $\gamma_e \approx 2,8 \frac{\text{MHz}}{\text{G}}$ (charakteristische physikalische Konstante für NV-Zentren)

B_{ZFS} Nullfeldaufspaltung $B_{\text{ZFS}} \approx 1028 \text{ G}$ (charakteristische physikalische Konstante für NV-Zentren)

B_{ges} gesamte magnetische Flussdichte

B magnetische Flussdichte des externen Magnetfelds

Bei der Umrechnung der magnetische Flussdichte von Gauss in Tesla gilt folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G} \quad (1.1)$$

Elektronenspinresonanz

Dies ist ein Verfahren zur Untersuchung von chemischen Reaktionen in der Biophysik und Materialforschung. Hier wird eine Probe einer konstanten Mikrowellenfrequenz ausgesetzt und das Magnetfeld variiert. Dadurch kann ein Absorptionsspektrum erstellt werden [11].

Funktionsprinzip ODMR

Bei ODMR wird die Elektronenspinresonanz (ESR) mit der optischen Auslese der Zustandsänderung kombiniert. Im Gegensatz zur normalen ESR wird bei der ODMR die Probe in ein statisches Magnetfeld eingebracht, wodurch die Zustände der spinabhängigen magnetischen Momente aufgespalten werden (der sog. Zeeman-Effekt, siehe Kapitel 1.6). Bestrahlt man nun die Probe mit einer sich verändernden Mikrowellenstrahlung und einem grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm, so fluoreszieren die NV-Zentren rotes Licht mit einer Wellenlänge von 637 nm (siehe Kapitel 1.2). Wird die Resonanzfrequenz (im Bereich von ca. 2,87 GHz [11]) erreicht, so geht die Stärke der Fluoreszenz um ca. 30 % zurück. Dadurch kann man mit einem Magnetfeld den $m_s = \pm 1$ Zustand und ohne Magnetfeld den $m_s = 0$ Zustand beobachten (siehe Abbildung 1.2).

Für die Resonanzfrequenz bei ODMR und das Magnetfeld gilt:

$$\omega_0 = \gamma_e B_{\text{ges}} \quad (1.2)$$

$$B_{\text{ges}} = B_{\text{ZFS}} \pm B \quad (1.3)$$

Die Nullfeldaufspaltung liegt bei $B_{\text{ZFS}} \approx 1028 \text{ G}$ bzw. $0,1028 \text{ T}$ (siehe Gleichung 1.1). Legt man kein externes Magnetfeld $B = 0 \text{ G}$ an, so ergibt sich eine Resonanzfrequenz von $\omega_0 = 2,87 \text{ GHz}$. Wird ein externes Magnetfeld angelegt, so werden die spinabhängigen Momente durch den Zeeman-Effekt aufgespalten. Daraus ergibt sich, dass aus einer Resonanzfrequenz zwei Resonanzfrequenzen werden. Der Unterschied wird in einem Fluoreszenzspektrum (siehe Abbildung 1.4 und 1.5) deutlich. Je stärker die externe magnetische Flussdichte ist, desto weiter bewegen sich die Resonanzfrequenzen auseinander. Dieser Zusammenhang ist linear (siehe Abbildung 1.7) [11].

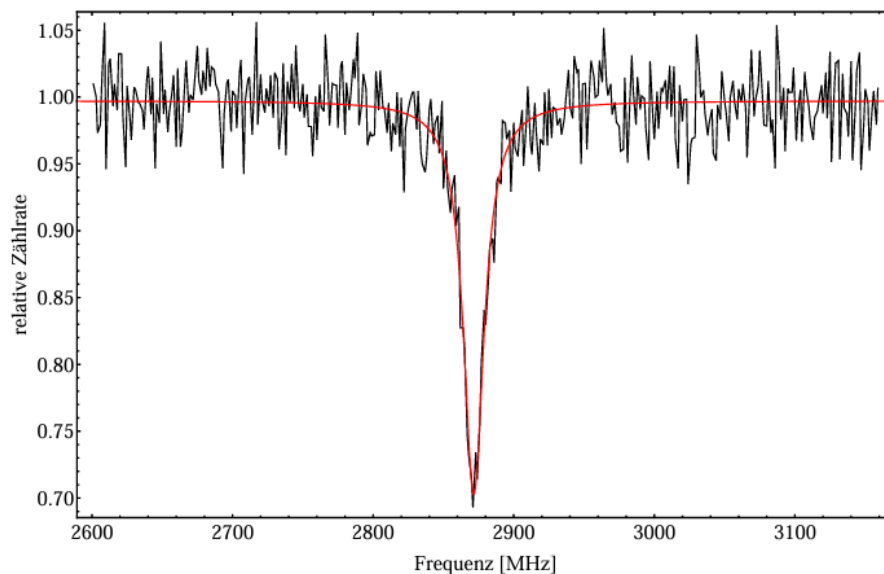


Abbildung 1.4: Fluoreszenzspektrum ohne externes Magnetfeld und einer Resonanzfrequenz bei 2,87 GHz [11].

Berechnung der magnetischen Flussdichte

Um die Anwendbarkeit der beiden Gleichungen 1.2 und 1.3 auf die Berechnung des Magnetfeldes in Meilenstein 3 zu belegen, wird ein Fluoreszenzspektrum aus [11] ausgewertet, exemplarisch berechnet und im Anschluss mit den Ergebnissen von Herr Verst verglichen.

Aus der Abbildung 1.5 können zwei Resonanzfrequenzen $\omega_1 = 2770 \text{ MHz}$ und $\omega_2 = 3010 \text{ MHz}$ abgelesen werden. Daraus ergibt sich eine Frequenz von $\omega_0 = 120 \text{ Hz}$.

$$\frac{3010 \text{ MHz} - 2770 \text{ MHz}}{2} = 120 \text{ MHz} \quad (1.4)$$

Durch Umstellen der Formeln 1.2 und 1.3 ergibt sich eine Flussdichte von $B_{\text{ZFS}} = 42,86 \text{ G}$.

$$B_{\text{ZFS}} = \frac{\omega_0}{\gamma_e} = \frac{120 \text{ MHz}}{2,8 \frac{\text{MHz}}{\text{G}}} \approx 42,86 \text{ G} \quad (1.5)$$

Der hier berechnete Wert $B_{\text{ZFS}} = 42,86 \text{ G}$ stimmt sehr gut mit dem in der Originalquelle auf Seite 68 "Daraus resultiert eine magnetische Flussdichte von $B_{\parallel} \approx 42,8 \text{ G}$..."

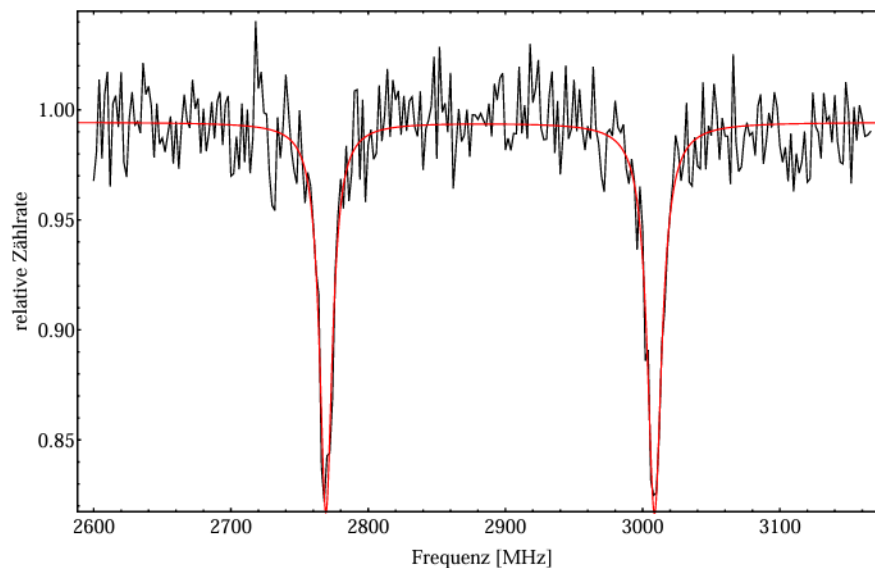


Abbildung 1.5: Fluoreszenzspektrum mit externem Magnetfeld und Aufspaltung durch den Zeeman-Effekt [11].

[11] angegebenen Wert überein. Die geringe Abweichung von 0,06 G bestätigt die Konsistenz des angewendeten Rechenwegs.

Messung von dynamischen Magnetfeldern

Dieses ODMR-Verfahren ist für die Messung von konstanten Magnetfeldern ausgelegt. Grund hierfür ist, dass eine Veränderung der Flussdichte auch unterschiedliche Resonanzfrequenzen zur Folge hätte. In der Beispielrechnung werden für die Resonanz die Werte $\omega_1 = 2770$ MHz und $\omega_2 = 3010$ MHz bestimmt. Diese Werte gehören zusammen. Würde sich die Flussdichte während der Messung ändern, so könnten beispielsweise die Werte $\omega_1 = 2770$ MHz (Resonanzfrequenz vor der Magnetfeldänderung) und $\omega_2 = 3500$ MHz (Resonanzfrequenz nach der Magnetfeldänderung) abgelesen werden, was das Endergebnis verfälschen würde. Somit ist die Messung von dynamischen Magnetfeldern nicht ideal.

Um dynamische Magnetfelder trotzdem bestimmen zu können, gibt es folgende Überlegungen.

1. sehr schnelle Messung des Fluoreszenzspektrums, damit sich das Magnetfeld nur geringfügig ändern kann und somit nur eine kleine Abweichung entsteht
2. mehrere Fluoreszenzspektren aufnehmen und diese auswerten, um einen Mittelwert oder Effektivwert zu bestimmen
3. Verwendung eines erweiterten Verfahrens, wie zum Beispiel der gepulsten ODMR

Vereinfachte Zusammenfassung

Erstellt man ein Fluoreszenzspektrum, wenn kein externes Magnetfeld anliegt, so ergibt sich (siehe Abbildung 1.4) genau ein Fluoreszenzeinbruch bei 2,87 GHz. Legt man nun ein externes Magnetfeld an, so spaltet sich der Fluoreszenzeinbruch auf. Je stärker die Flussdichte dieses Magnetfeldes wird, desto weiter entfernen sich die

beiden Einbrüche (siehe Abbildung 1.5) voneinander. Dieser Zusammenhang ist linear (siehe Abbildung 1.7).

1.6 Zeeman-Aufspaltung

Im letzten Abschnitt wurde die Aufspaltung der Resonanzfrequenz mithilfe eines externen Magnetfelds betrachtet. Im Folgenden wird der zugrundeliegende physikalische Effekt, die sogenannte Zeeman-Aufspaltung, näher betrachtet.

In Kapitel 1.2 wurde bereits deutlich, dass ein NV-Zentrum im Grundzustand die drei Energieniveaus $m_s = -1, 0, 1$ mit einer Resonanzfrequenz von 2,87 GHz besitzt. Diese Resonanzfrequenz tritt nur dann zu, wenn kein externes magnetisches Feld anliegt. Geht das System in Resonanz, hat dies Einbrüche in der Fluoreszenz zur Folge (siehe Kapitel 1.5).

Wird ein Magnetfeld angelegt, so spalten sich der Dublett-Zustand $m_s = \pm 1$ und die Resonanzfrequenz auf. Dabei wird der Abstand zwischen den beiden Energieniveaus und den beiden Resonanzfrequenzen (siehe Abbildung 1.6) immer größer [4]. Dieser Vorgang kann auch in den Abbildungen 1.4 und 1.5 betrachtet werden.

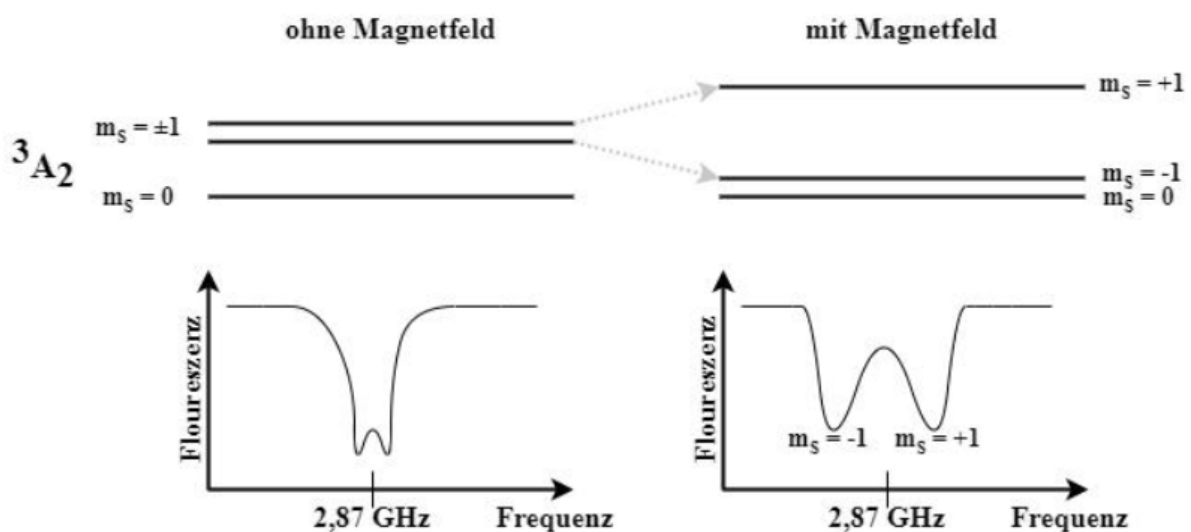


Abbildung 1.6: Vereinfachte Darstellung des Zeeman-Effekts [4].

Der beschriebene Effekt ist als Zeeman-Effekt bzw. Zeeman-Aufspaltung bekannt und von der Größe der magnetischen Flussdichte abhängig. Hierbei ergibt sich ein linearer Zusammenhang (siehe Abbildung 1.7).

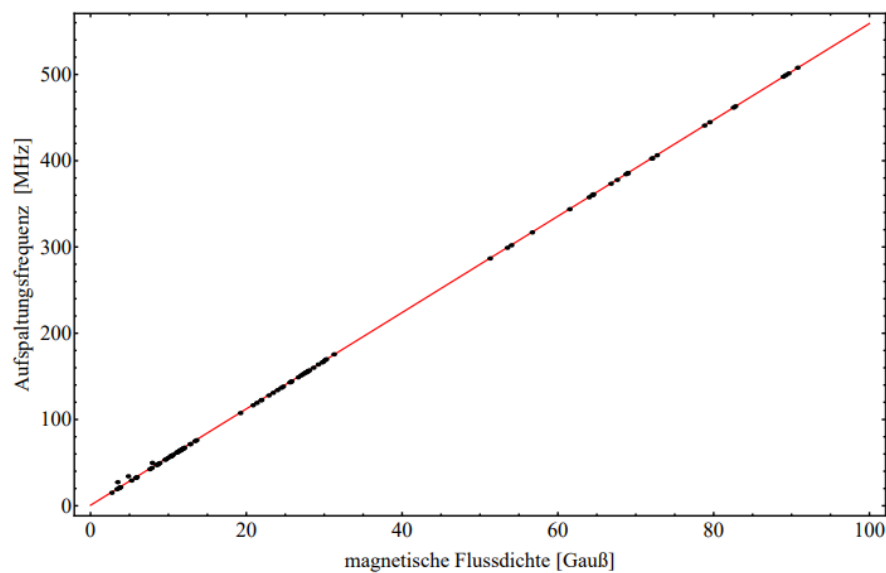


Abbildung 1.7: Linearer Zusammenhang zwischen der Flussdichte und dem Abstand zwischen beiden Resonanzfrequenzen [11].

Kapitel 2

Meilenstein 1: Quenching Experiment

Der erste der drei Meilensteine befasst sich mit einem einfachen Experiment. Hierbei soll eine Magnetfeldänderung mittels einer LED angezeigt werden.

Hierfür wird eine grüne LED dauerhaft angesteuert. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wird das grüne Licht vom NV-Zentrum absorbiert und durch quantenmechanische Effekte in rotes Licht umgewandelt. Dieses ausgesendete Licht wird von einer Fotodiode aufgenommen und in einen Strom umgewandelt. Mit einer indirekten Messung wird der Strom digitalisiert und in der senseBox verarbeitet. Wird dort eine Magnetfeldänderung erkannt, beginnt eine grüne Anzeige-LED zu leuchten [5].

2.1 Versuchsaufbau

Für die Verdrahtung wird der gegebene Schaltplan 2.1 aus der Versuchsbeschreibung [5] verwendet. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt auf grundlegende Berechnungen und Montagehinweise eingegangen, wobei auf die genaue Funktionsweise des Versuchs später im Kapitel 2.3 eingegangen wird.

Berechnung R1

Beim Widerstand R1 handelt es sich um einen Vorwiderstand, der den Strom durch die grüne Anrege-LED (siehe LED1 in Abbildung 2.1) einstellt. An der LED1 (Anregung) fallen laut der Versuchsbeschreibung [5] 3,2 V ab. Dies bedeutet, dass aufgrund der Reihenschaltung 1,8 V am Widerstand R1 abfallen, wobei der Spannungsfall an der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors vernachlässigt werden kann.

$$5\text{ V} - 3,2\text{ V} = 1,8\text{ V} \quad (2.1)$$

Zudem soll durch die LED ein Strom von 30 mA fließen. Daraus ergibt sich ein Widerstand von 60 Ohm. Für R1 wird mit 62 Ohm der nächste übliche Wert in der E-Reihe gewählt.

$$\frac{1,8\text{ V}}{30\text{ mA}} = 60\text{ }\Omega \quad (2.2)$$

Berechnung des Basisstroms

Damit durch die LED1 der berechnete Strom fließen kann, muss der Transistor (siehe

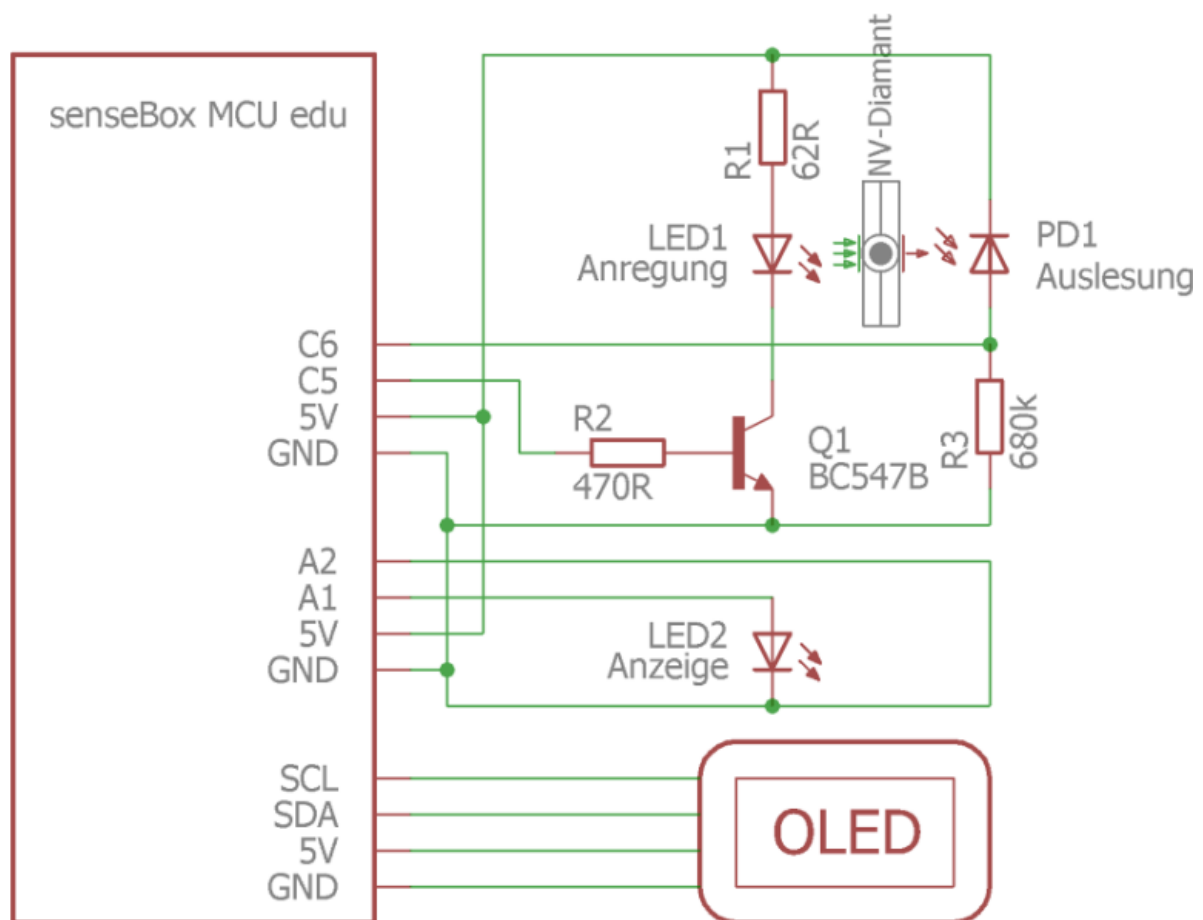


Abbildung 2.1: Schaltplan zum Quenchingversuch [5].

Q1 in Abbildung 2.1) mit einem ausreichenden Basisstrom versorgt werden.

Der Transistor (Typ BC547B) wird als Schalter genutzt. Gleichzeitig steht der Widerstand R2 mit 470 Ohm aus der senseBox zur Verfügung. Der Ausgangswiderstand der senseBox liegt bei 330 Ohm und stellt eine Spannung von 3,3 V zur Verfügung. Zudem fallen weiter 0,7 V an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors ab. Daraus ergibt sich ein Ersatzwiderstand von 800 Ohm und ein dazugehöriger Spannungsfall von 2,6 V.

$$470 \, \Omega + 330 \, \Omega = 800 \, \Omega \quad (2.3)$$

$$3,3 \, \text{V} - 0,7 \, \text{V} = 2,6 \, \text{V} \quad (2.4)$$

Es ergibt sich durch das ohmsche Gesetz ein Basisstrom von $I_B = 3,25 \, \text{mA}$. Gemäß Datenblatt [3] hat der Transistor im schlechtesten Fall eine Verstärkung von $h_{FE} = 200$ und folglich einen Kollektorstrom von 650 mA. Somit kann die LED problemlos mit 30 mA betrieben werden.

$$I_B = \frac{2,6 \, \text{V}}{800 \, \Omega} = 3,25 \, \text{mA} \quad (2.5)$$

$$I_C = 200 \cdot 3,25 \, \text{mA} = 650 \, \text{mA} \quad (2.6)$$

Dimensionierung von R3

Um den erzeugten Strom der Fotodiode (siehe PD1 in Abbildung 2.1) indirekt zu messen, wird der Widerstand R3 benötigt. Dieser wandelt den Stromfluss in einen dazugehörigen Spannungsfall um, der dann von der senseBox quantisiert wird.

Gemäß der Versuchsbeschreibung [5] im Abschnitt "Die Funktion – Messung des Fotodiodenstroms und Anzeige-LED" kann ein Widerstand von 330 kOhm-1 MOhm gewählt werden, wobei mit 680 kOhm gute Ergebnisse erzielt werden konnten: "wir haben gute Erfahrungen mit 680 kOhm gemacht."

Anzeige LED2

Da die digitalen Ausgänge der senseBox bereits einen Ausgangswiderstand von 330 Ohm aufweisen und eine Ausgangsspannung von 3,3 V, kann auf einen Vorwiderstand verzichtet werden.

Positionierung der Fotodiode

Diese wird in Sperrrichtung betrieben (vergleiche Abbildung 2.3). Zusätzlich muss das NV-Zentrum möglichst mittig und nah an der Fotodiode positioniert werden (siehe Abbildung 2.2).

Die Positionierung kann bei der ersten Inbetriebnahme noch optimiert werden. Hierfür kann die Position des NV-Zentrums über der Fotodiode leicht verändert werden. Die OLED zeigt in der obersten Zeile den aktuellen Spannungswert an (siehe Kapitel 2.2.1 bzw. Abbildung 2.4). Je größer dieser Wert wird, desto besser ist das Zentrum über der Fotodiode positioniert. Bleibt der Wert gleich, dann liegt ein Fehler vor (z.B. Fotodiode hat falsche Polarität oder mangelnder Kontakt zum Klemmbrett).

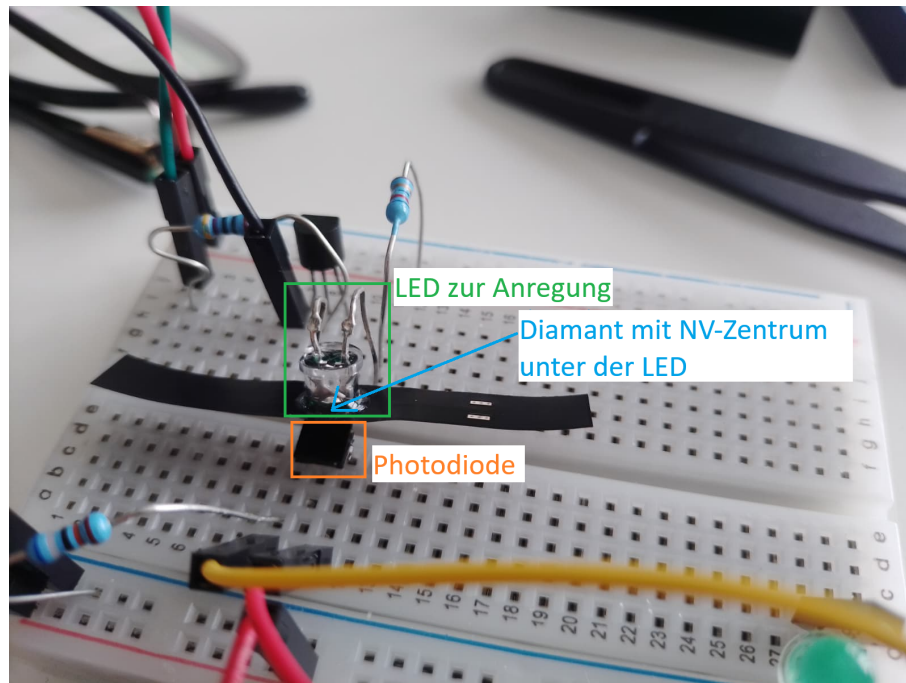


Abbildung 2.2: Richtige Positionierung der Fotodiode und des NV-Zentrums. Um die Bauteile besser identifizieren zu können, wurde der Abstand zwischen Fotodiode und NV-Zentrum vergrößert

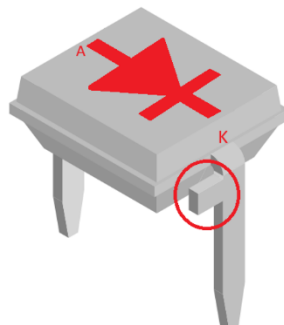


Abbildung 2.3: Kathode und Anode der Fotodiode [5].

2.2 Programm

Für die Ansteuerung und die Auswertung der senseBox wurde das gegebene Programm vom Versuchsaufbau verwendet und angepasst [5]. Im folgenden Abschnitt wird auf zentrale Punkte und Änderungen eingegangen.

2.2.1 Zentrale Variablen und OLED

Hier werden die zentralen Variablen und die dazugehörige Positionierung auf der OLED (siehe Abbildung 2.4) eingeführt. Da auf die genaue Variablenbezeichnung in der Versuchsbeschreibung [5] nicht eingegangen wird, werden diese aus dem Funktionskontext (siehe Abbildungen 2.5a und 2.5b) abgeleitet.

alpha

Bestimmt, wie stark filtOut gewichtet wird und befindet sich in der zweiten Zeile links.

filtOut (filter Output)

Bestimmt, wie stark sich die Helligkeit seit der letzten Messung geändert hat und wird in der untersten Zeile der OLED angezeigt. Dadurch kann indirekt eine Magnetfeldänderung erkannt werden.

filtnpOld (filter input Old)

Gespeicherter AINVAL-Wert vom letzten Programmdurchlauf.

AINVAL (Analog Input Value)

Summe aller Spannungsmessungen in der Schleife. Dabei werden mehrere Zeitpunkte hintereinander gemessen, um die Stärke von Störungen zu reduzieren. Dieser Wert findet sich in der obersten Zeile und repräsentiert die indirekte Messung der Helligkeit des NV-Zentrums (siehe Kapitel 2.3).

PWMVAL255 (PWM-Value)

Soll in der Theorie die Helligkeit der Anrege-LED mit einer Pulsweitenmodulation (PWM) steuern. Allerdings konnte bei der Versuchsdurchführung keine Änderung der LED-Helligkeit festgestellt werden. Dieser Variablenwert wird in der zweiten Zeile rechts angezeigt.

2.2.2 Programmzyklus

Nachdem die grundlegenden Variablen bekannt sind, kann im Folgenden deren Zusammenwirken dargestellt werden.

Zu Beginn eines jeden Zyklus wird der alte Messwert von AINVAL in der Variable filtnpOld gespeichert und wieder auf 0 gesetzt. Im Anschluss wird die Helligkeit an der Fotodiode über den Port C6 ausgewertet. Hierfür wird eine Schleife durchlaufen, die die Messwerte über einen längeren Zeitraum aufsummiert, um den Einfluss von Störgrößen zu reduzieren. Im Anschluss wird die Helligkeitsänderung mit der Formel



Abbildung 2.4: 1. Zeile: AINVAL (Summe mehrerer Spannungsmessungen)
 2. Zeile links: alpha (Gewichtung von filtOut)
 2. Zeile rechts: PWMVAL255 (Einstellbare Helligkeit der LED)
 3. Zeile: filtOut (Helligkeitsänderung) [5].

(siehe Abbildung 2.5a)

$$filtOut = (\alpha * filtOut) + (AINVAL - filtInpOld) \quad (2.7)$$

berechnet und mit einem negativen Wert verglichen. Ist die Helligkeitsänderung kleiner als dieser Vergleichswert, dann wird dies als Magnetfeldänderung interpretiert und der digitale Pin A1 gesetzt. Dadurch beginnt die Anzeige-LED zu leuchten. Der Rest des Zyklus ist für die Anzeige am OLED zuständig (siehe Abbildung 2.4). Welche Werte zu erwarten sind, wird im Kapitel 2.3 genauer erklärt. Zudem wird eine serielle USB-Schnittstelle abgehandelt, die bei diesem Versuch keine Rolle mehr spielt.

2.2.3 Programm auf senseBox übertragen

Bevor das Programm getestet werden kann, muss dieses auf die senseBox übertragen werden. Dies geschieht wie folgt:

1. Blockly-Programm im Browser kompilieren (Download erfolgt automatisch), wodurch man eine .bin Datei erhält.
2. Reset-Taster auf der senseBox zweimal schnell drücken. Dadurch öffnet sich ein neuer Datenträger im Datei-Explorer.
3. .bin Datei in diesen neuen Datenträger einfügen. Diese wird automatisch erkannt und gestartet.

2.2.4 Eigenschaften und Anpassungen

Nach dem Übertragen auf die senseBox konnten erste Testläufe durchgeführt werden. Hierbei ist eine Eigenheit aufgefallen, die näher im nächsten Punkt beschrieben wird. Zudem mussten einige Variablenwerte angepasst werden, um die Zuverlässigkeit der Messung zu verbessern.

Eigenschaften des Programms

Das Programm muss sich zum Start und nach jeder stärkeren Magnetfeldänderung erst wieder bei $\text{filtOut}=0$ einpendeln (letzte Zeile am Display in Abbildung 2.4), da sonst eine Magnetfeldänderung nicht erkannt werden kann.

Anpassungen an der Vorlage

Aufgrund der langen Schleife (100 Iterationen) von über 100 ms reagierte filtOut mit zufälligen großen Sprüngen (vermutlich durch Störgrößen), wodurch eine Magnetfeldänderung angezeigt wurde, obwohl keine Änderung stattgefunden hat. Gelöst wurde dies durch eine Reduzierung der Schleifendurchläufe auf 10.

Zusätzlich wurde α von 0.9 auf 0.99 erhöht, da sonst durch die Reduzierung der Iterationen α eine zu große Auswirkung auf filtOut hatte. Dies führt allerdings zu einer noch akzeptablen Verlängerung der Einpendelzeit.

Ein weiteres Problem war, dass filtOut immer um den Wert 0 pendelt, weshalb Pin A1 immer wieder falsch gesetzt wurde. Deshalb wurde der Vergleichswert $\text{filtOut} < -1$ auf $\text{filtOut} < -20$ geändert.

2.3 Funktionsweise

Da nun der Versuchsaufbau und das dazugehörige Programm bekannt sind, kann daraus eine Funktionsweise abgeleitet werden. Hierbei werden zwei Szenarien berücksichtigt. Zum einen eine Magnetfeldänderung durch Annähern eines Magneten und zum anderen keine Magnetfeldänderung durch das feste Positionieren des Magneten.

Fließt Strom durch die LED1, so wird grünes Licht in den Diamanten mit dem NV-Zentrum gestrahlt. Dieser absorbiert das Licht, wodurch der Elektronenspin in den angeregten Zustand gehoben wird. Bei der Relaxation wird der stabile Grundzustand erreicht, was eine Emission von rotem Licht zur Folge hat (vergleiche Kapitel 1.2). Dieses Licht wird von der Fotodiode in einen Strom umgewandelt, der mithilfe eines Spannungsfalls an R3 gemessen und digitalisiert wird. Um Verfälschungen des Messwertes zu vermeiden, wird die Fotodiode mit einem Filter belegt. Dadurch kann nur das rote Licht passieren und alle unerwünschten Wellenlängen (z.B. das Grün der Anrege-LED) werden herausgefiltert. Nach der Digitalisierung wird das dazugehörige Programm (siehe Kapitel 2.2.2) abgehandelt, das die Messwerte wie folgt interpretiert.

1. Keine Magnetfeldänderung (Magnet bleibt an der gleichen Position)

Die Menge an emittiertem rotem Licht bleibt gleich $\rightarrow$ Fotostrom und digitalisierter Wert bleiben gleich $\rightarrow$ keine Helligkeitsänderung erkannt $\rightarrow \text{filtOut}=0$ (letzte Zeile OLED) und Anzeige-LED leuchtet nicht

Algorithm 1 Programmablauf

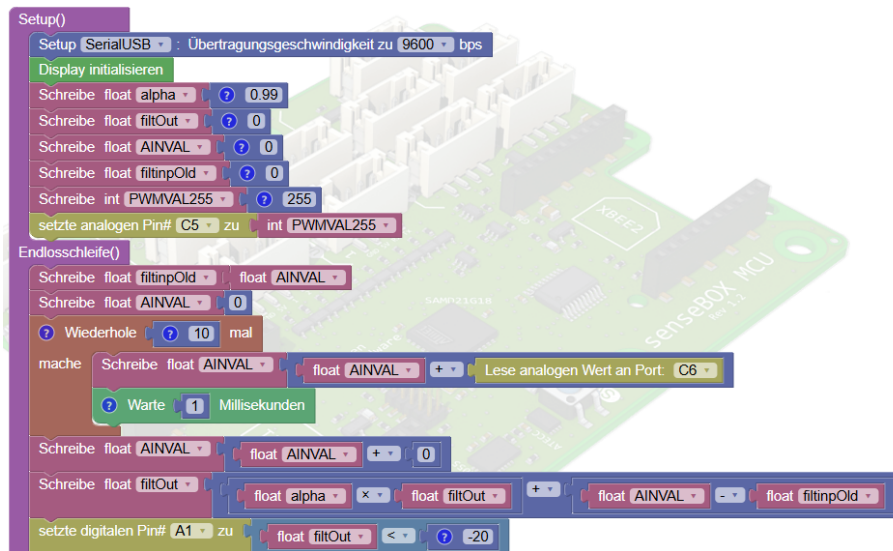
Parameter: $\alpha \leftarrow 0.99$, $filtOut \leftarrow 0$, $AINVAL \leftarrow 0$, $filtpOld \leftarrow 0$, $PWMVAL255 \leftarrow 255$

Ausgangsgröße: Anzeige der Messwerte auf OLED und Steuerung der Anzeige-LED

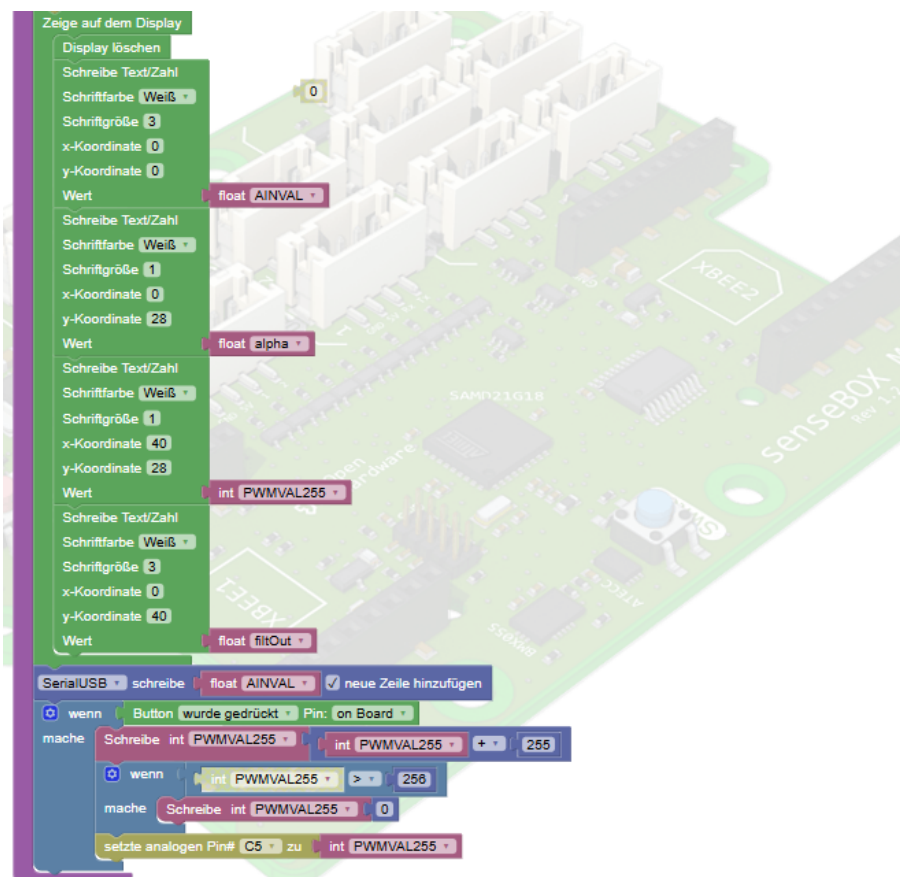
```

1: procedure LOOP
2:    $filtpOld \leftarrow AINVAL$ 
3:    $AINVAL \leftarrow 0$ 
4:   for  $i = 1$  to 10 do                                ▷ Messwert über mehrere Iterationen speichern
5:      $AINVAL \leftarrow AINVAL + analogRead(A6)$ 
6:      $delay(1)$ 
7:   end for
8:    $AINVAL \leftarrow AINVAL + 0$                                 ▷ Offset
9:    $filtOut \leftarrow \alpha \cdot filtOut + (AINVAL - filtpOld)$     ▷ Berechnung
   Helligkeitsänderung
10:
11:    $digitalWrite(1, (filtOut < -20))$                         ▷ Steuerung Anzeige-LED
12:
13:    $display.clearDisplay()$                                 ▷ Ausgabe über Display von OLED
14:    $display.setCursor(0,0)$ 
15:    $display.setTextSize(3)$ 
16:    $display.setTextColor(WHITE,BLACK)$ 
17:    $display.println(AINVAL)$ 
18:    $display.setCursor(0,28)$ 
19:    $display.setTextSize(1)$ 
20:    $display.setTextColor(WHITE,BLACK)$ 
21:    $display.println(\alpha)$ 
22:    $display.setCursor(40,28)$ 
23:    $display.setTextSize(1)$ 
24:    $display.setTextColor(WHITE,BLACK)$ 
25:    $display.println(PWMVAL255)$ 
26:    $display.setCursor(0,40)$ 
27:    $display.setTextSize(3)$ 
28:    $display.setTextColor(WHITE,BLACK)$ 
29:    $display.println(filtOut)$ 
30:    $display.display()$ 
31:    $SerialUSB.println(AINVAL)$ 
32: end procedure

```



(a) Blocklyprogramm Codeausschnitt 1: Initialisierung und Verarbeitung



(b) Blocklyprogramm Codeausschnitt 2: Ausgabe über das Display

Abbildung 2.5: Blocklyprogramm-Codeausschnitte

2. Magnetfeldänderung (Annähern mit einem Magneten)

Die Menge an emittiertem rotem Licht durch das NV-Zentrum ändert sich durch den Quenching-Effekt (siehe Kapitel 1.4) → Fotostrom und digitalisierter Wert ändern sich → neuer und alter Helligkeitswert sind unterschiedlich → Helligkeitsänderung → $\text{filtOut} < -20$ (letzte Zeile OLED) und Anzeige-LED leuchtet.

Beim zweiten Szenario ist ein negativer filtOut zu erwarten, da die Magnetfeldstärke beim NV-Zentrum beim Annähern eines Magnetfeldes steigt. Wie in Kapitel 1.4 bereits dargestellt, wird das emittierte rote Licht bei einem hohen Magnetfeld durch das Quenching reduziert. Dadurch sinkt der Fotostrom und somit auch der gemessene Wert in AINVAL . Da im Blocklyprogramm der filtOut mit der Gleichung 2.7 berechnet wird und der filtinOld größer als AINVAL ist, wird filtOut entsprechend negativ (Annahme: filtOut hat sich vor der Magnetfeldänderung bei 0 eingependelt).

2.4 Ergebnisse und Durchführung

Bei der Durchführung des Versuchs wird sich mit einem Stabmagneten dem NV-Zentrum genähert. Dies wird einmal mit und ohne Gehäuse durchgeführt, damit der Einfluss des Umgebungslichtes untersucht werden kann. Bei der Versuchsdurchführung ist zu beachten, dass sich die unterste Zeile des OLEDs (filtOut) bei 0 eingependelt hat, um eine zuverlässige Messung zu gewährleisten (vgl. 2.6).

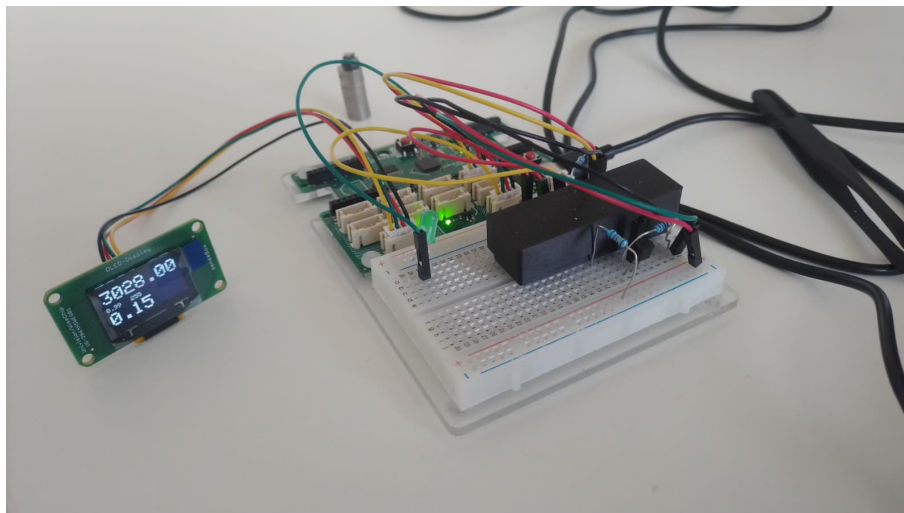


Abbildung 2.6: Quenching: filtOut (untere Zeile Display) ist bei 0 eingependelt und grüne Anzeige-LED ist aus. Nächste Messung kann durchgeführt werden

2.4.1 Durchführung ohne Gehäuse

Zuerst wird der Versuch ohne Gehäuse durchgeführt. Somit kann die Fotodiode auch durch Umgebungslicht beeinflusst werden.

Beobachtungen

- Beim Annähern eines Magneten beginnt die Anzeige-LED oft zu leuchten und filtOut hat unterschiedlich starke negative Werte. Diese reichen von über -1000 bis teilweise nur -3.
- filtOut verhält sich dabei sehr ungewöhnlich. Bei gleicher Annäherungsgeschwindigkeit und bei gleichem Abstand unterscheiden sich die Werte zum Teil massivst (Werte von -1000 bis -3).
- Nähert man sich nur mit der Hand ohne Magnet, werden bei filtOut teilweise auch starke Änderungen von über -100 erkannt und die Anzeige-LED beginnt zu leuchten.
- Je näher sich der Magnet dem NV-Zentrum annähert, desto negativer werden die Werte. Bei einem Abstand von wenigen Millimetern vom NV-Zentrum werden Werte von über -1000 erreicht.

Schlussfolgerung

Bereits kleinste Änderungen im Umgebungslicht (z.B. Schattenwurf der Hand) können die Messergebnisse massiv verfälschen. Dies führt dazu, dass die Anzeige-LED als nicht zuverlässig betrachtet werden kann.

Je weiter sich die Magnetfeldänderung filtOut vom Nullpunkt entfernt, desto zuverlässiger kann auf eine Magnetfeldänderung geschlossen werden. So kann ein kleiner negativer Wert wie z.B. -100 durch eine reine Änderung des Umgebungslichtes (z.B. Schattenwurf) verursacht werden. Je weiter der Wert ins Negative wandert, desto zuverlässiger kann auf eine Änderung des Magnetfeldes geschlossen werden. Beispielsweise zeigt ein filtOut von über -1000 eine sichere Magnetfeldänderung an.

Wenn der Vergleichswert an Pin A1 weiter verändert wird (z.B. $\text{filtOut} < -800$), könnte das NV-Zentrum beispielsweise als Näherungssensor verwendet werden.

2.4.2 Durchführung mit Gehäuse

Bei der zweiten Durchführung wird das dazugehörige Gehäuse verwendet. Somit kann der Einfluss von Umgebungslicht ausgeschlossen werden.

Beobachtungen

- Umgebungslicht hat keinen Einfluss mehr
- Leichtes Verschieben des Gehäuses bewirkt eine massive Helligkeitsänderung, wobei der Wert rein zufällig negativ oder positiv ist.
- Kommt man dem Gehäuse zu nah, dann kann es passieren, dass die Anrege-LED aus dem Klemmbrett gezogen wird, was zu einer massiven Helligkeitsänderung führt (filtOut zwischen -3000 und -2000) → Magnet muss mindestens 5 mm vom Gehäuse entfernt bleiben, damit dies nicht geschieht
- Nähert man sich mit dem Magneten dem Gehäuse, so führt dies zu einem filtOut zwischen -200 und -40 (siehe Abbildung 2.7).

- Bleibt man mit dem Magneten stehen, so strebt `filtOut` wieder gegen 0 (wobei durch leichtes unbeabsichtigtes Bewegen Sprünge von einigen Dekaden in beide Richtungen möglich sind)
- Gelegentlich beginnt `filtOut` nach Entfernen des Magnetfelds zwischen -30 und einem positiven Wert zu springen, was eine blinkende Anzeige-LED zur Folge hat. Dies lässt sich durch Annähern des Magneten und das Halten für einige Sekunden auf der gleichen Position (bis sich `filtOut` über -20 befindet) beheben.
- Nach dem Entfernen des Magnetfeldes beginnt `filtOut` entweder von einem negativen Wert (wenn Magnet nur kurzzeitig in der Nähe des NV-Zentrums war) oder einem positiven Wert (wenn Magnet länger auf der gleichen Position gehalten wird) gegen 0 zu streben.
- Beim Entfernen des Magnetfelds wird eine positive Änderung an `filtOut` erkannt. Diese ist jedoch deutlich geringer als die negative beim Annähern des Magneten.

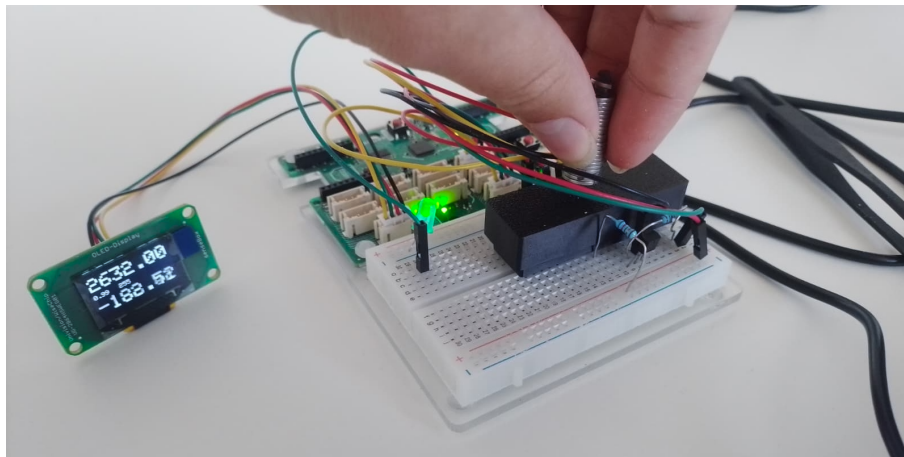


Abbildung 2.7: Magnetfeld hat sich beim NV-Zentrum geändert, weshalb es zum Quenching-Effekt kommt. Dies ist erkennbar, da `filtOut` (untere Zeile Display) -182 anzeigt. Somit leuchtet auch die grüne Anzeige-LED minimal

Schlussfolgerung

Durch das Gehäuse konnten die Einflüsse des Umgebungslichtes beseitigt werden. Neue Probleme ergeben sich dadurch, dass die LED nur noch wenige Millimeter im Klemmbrett verankert ist. Dadurch kann die LED kurzzeitig oder dauerhaft aus der Verankerung gerissen werden, was die Messung verfälscht. Eine einfache Problemlösung ist, dass der Magnet zu jeder Zeit mindestens 5 Millimeter vom Gehäuse entfernt bleibt.

Mit dieser Vorsichtsmaßnahme lässt sich eine Magnetfeldänderung ziemlich zuverlässig bestimmen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass `filtOut` nach jeder Messung wieder zurück zum 0-Wert pendelt. Sonst kann das Ergebnis verfälscht werden. Außerdem lässt sich die Stärke der Magnetfeldänderung anhand von `filtOut` nicht genau vorher-sagen.

Der positive oder negative `filtOut` Wert nach Entfernen des Magnetfelds lässt sich wie folgt erklären. Befindet sich der Magnet nur kurz in der Nähe des NV-Zentrums, so wird ein negativer `filtOut` gemessen (z.B. -100). Entfernt man den Magneten wieder,

so ergibt sich, wie bei der Beobachtung geschildert, ein kleinerer positiver `filtOut` (z.B. +50). Zusammengerechnet ergibt dies dann einen weiterhin negativen Wert von `filtOut`=-50. Bleibt das Magnetfeld eine längere Zeit in Position, so beginnt der Beispielswert von -100 langsam gegen 0 zu streben. Wird nun das Magnetfeld z.B. bei -25 entfernt, so ergibt sich zusammen ein positiver `filtOut` von +25. (Anmerkung: Diese Werte sind Beispielswerte zur einfachen Veranschaulichung, da in der Praxis diese Werte bei gleicher Durchführung starken Schwankungen unterliegen).

2.4.3 Abschlussergebnis Versuch Quenching

Nachdem der Versuch mit und ohne Gehäuse durchgeführt wurde und die Ergebnisse in den Schlussfolgerungen interpretiert wurden, lässt sich folgendes abschließendes Ergebnis ermitteln.

Die Verwendung des Gehäuses ist zwingend erforderlich, genauso wie ein Abstand von wenigen Millimetern zwischen Magnet und Gehäuse. Außerdem muss auf das korrekte Auspendeln von `filtOut` auf den 0-Wert geachtet werden.

Bei diesem Versuch kann eine Magnetfeldänderung zuverlässig bestimmt werden, wobei nicht vorhergesagt werden kann, wie stark die Magnetfeldänderung bzw. das Magnetfeld ist. Dieser Versuch ist eher als "Proof of Concept" zu betrachten, der belegt, dass NV-Zentren Magnetfeldänderungen erkennen und messen können. Eine genauere Bestimmung wird allerdings erst während des nächsten Versuchs mit ODMR möglich sein.

Anmerkung für die weiteren Meilensteine

Um den starken Einfluss des Umgebungslichtes zu eliminieren, wird ab jetzt das Gehäuse dauerhaft verwendet.

Kapitel 3

Meilenstein 2: ODMR Experiment

Beim ODMR Experiment wird die Schaltung um einen Mikrowellengenerator (ADF4351) erweitert. Dieser Generator durchläuft mit einer festen Schrittbreite einen Frequenzbereich von beispielsweise 2,67 GHz bis 3,07 GHz. Das NV-Zentrum reagiert auf die Frequenzen unterschiedlich, wie aus Kapitel 1.5 hervorgeht. Daraus wird ein Fluoreszenzspektrum erstellt, aus dem die Resonanzminima ablesen werden können.

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau von ODMR ist dem von Meilenstein 1 sehr ähnlich. Es gibt folgende Unterschiede [5]:

- Der Widerstand R3 wird von 680kOhm auf 330kOhm reduziert.
- Das OLED-Display wird nicht mehr benötigt und kann entfernt werden.
- Eine weitere Anzeige-LED wird hinzugefügt, die vom Ausgang DO2 angesteuert wird.
- Ein Mikrowellengenerator (hier ADF4351) muss hinzugefügt werden

3.1.1 Kommunikationsprobleme zwischen der senseBox und dem Mikrowellengenerator

Die senseBox muss über eine SPI-Schnittstelle die Register des Mikrowellengenerators (ADF4351) beschreiben. Diese Register bestimmen, welche Frequenz er ausgibt. Hier konnte offenbar keine vernünftige Kommunikation aufgebaut werden, da der Mikrowellengenerator nie eine Frequenz ausgegeben hat. Nach einigen Messungen mit dem Multimeter wurde festgestellt, dass die SPI-Schnittstelle Daten sendet.

Testweise wurde der ADF4351 von der senseBox getrennt und direkt über den PC mithilfe eines Testskripts und eines FT232H Adapter angesteuert. Im Anschluss wurde eine Frequenz von 100MHz erzeugt, was belegt, dass der Mikrowellengenerator funktionsfähig ist. Danach wurde das Testskript für die senseBox angepasst und wieder mit

dem ADF4351 verbunden. Hier wurde keine Frequenz erzeugt.

Deshalb wurde geschlussfolgert, dass diese senseBox nicht zur Erzeugung der benötigten Frequenzen verwendet werden kann und dass dafür in den kommenden Versuchen der FT232H Adapter zur Frequenzerzeugung genutzt werden muss. Im Folgenden werden die wichtigsten Änderungen zur originalen Versuchsbeschreibung von Qoool [6] aufgezählt, wobei auf die genaue Implementierung erst in späteren Kapiteln eingegangen wird.

- Alle Verbindungsleitungen zwischen dem Mikrowellengenerator und der senseBox werden nicht mehr benötigt. Stattdessen muss der ADF4351 mit dem FT232H Adapter verdrahtet werden.
- Die Treiber für den ADF4351 von Qoool [6] werden nicht mehr benötigt. Dies beinhaltet alle .cpp und .h Dateien
- Die Python-Datei und das Arduino-Programm von Qoool [6] können mit Anpassungen genutzt werden.
- Es wird eine neue Python-Datei erstellt, deren Aufgabe es ist, die korrekte Registerbeschreibung des ADF4351 durchzuführen, damit dieser die korrekten Frequenzen ausgeben kann.

3.1.2 Implementierung

Im letzten Abschnitt wurde begründet, weshalb der Adapter FT232H verwendet wird. Dieser Abschnitt befasst sich damit, wie der Versuchsaufbau mit dem Adapter hardwareseitig umgesetzt wird. Zum Vergleich wird auch der Originalschaltplan (siehe Abbildung 3.2) von Qoool [6] angegeben. Es ist darauf zu achten, dass bei der Verwendung eines FT232H Adapters der Schaltplan von Abbildung 3.3 genutzt wird.

Widerstände

Da die Verbindung zwischen senseBox und ADF4351 nicht benötigt wird, werden die beiden Widerstände R4 und R5 auch nicht mehr benötigt.

R3 soll gemäß dem Originalschaltplan (siehe Abbildung 3.2) 330 kOhm betragen. Da dieser nicht verfügbar war, wurde ein 300 kOhm und ein 36 kOhm in Reihe geschaltet. Somit ergibt sich ein Ersatzwiderstand von 336 kOhm (siehe Abbildung 3.3).

$$36 \text{ k}\Omega + 300 \text{ k}\Omega = 336 \text{ k}\Omega \quad (3.1)$$

Da der 330 kOhm Widerstand je nach E-Reihe mehrere Prozent Toleranz besitzt, kann die Reihenschaltung problemlos als Ersatz genutzt werden.

Mikrowellengenerator ADF4351

Wie oben schon angedeutet, wird die senseBox nicht mehr mit dem ADF4351 verbunden. Das heißt, dass keine einzige Verbindungsleitung zwischen senseBox und Mikrowellengenerator mehr existiert. Die Anschlüsse an der senseBox SCK, CS, MOSI und DO4, DI3, 5V, GND bleiben infolgedessen leer.

Stattdessen werden die Anschlüsse des ADF4351 mit dem Adapter FT232H entsprechend dem Schaltplan in Abbildung 3.3 verdrahtet. Zusätzlich benötigt der Mikrowellengenerator eine externe Versorgungsspannung von 5V, da der Adapter den benötigten Strom nicht zur Verfügung stellen kann.

Um die Mikrowellen möglichst ungedämpft zum NV-Zentrum zu bringen, wird der Mikrowellenausgang des ADF4351 mit einem "CBA-UFLSMAM25" Koaxialkabel mit dem Resonator des NV-Zentrums verbunden.

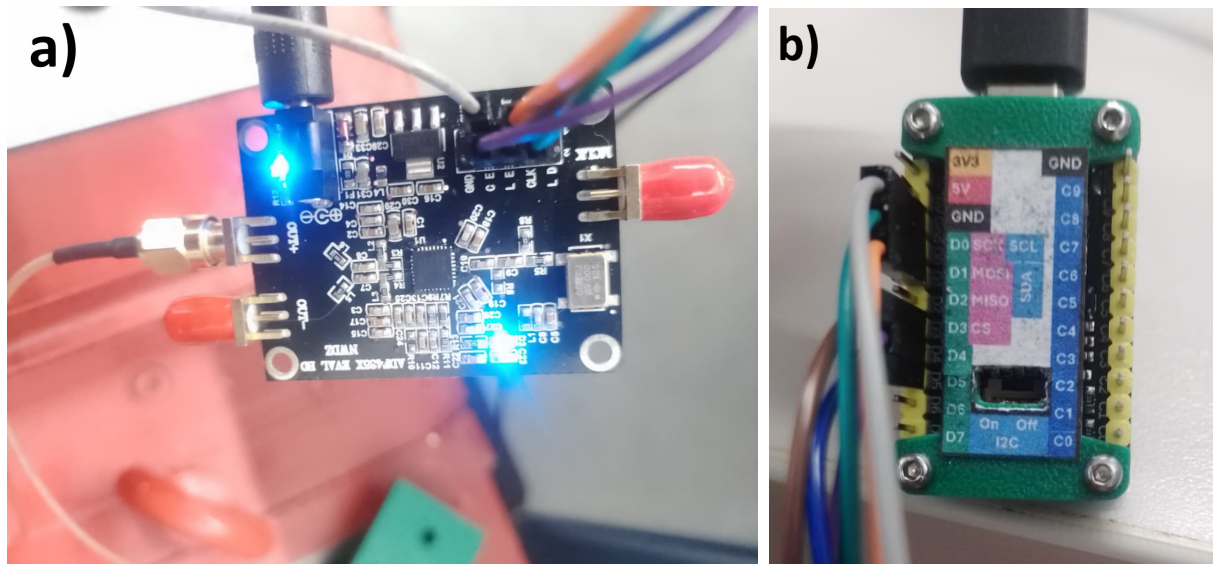


Abbildung 3.1: a) Mikrowellengenerator ADF4351
b) Adapter FT232H

3.2 Programm

Zur Ausführung der Programme werden Arduino IDE und Visual Studio Code (mit Python Erweiterung) genutzt. Wie im letzten Kapitel schon erwähnt, wird zur Kommunikation mit dem Mikrowellengenerator ein FT232H Adapter verwendet. Dies hat zur Folge, dass die gegebenen Programme von Qoool [6] nicht mehr genutzt werden können und nur noch als Grundgerüst dienen. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Treiber für den ADF4351 nicht mehr benötigt werden (betrifft die .cpp und .h Dateien) und dass das Arduino (.ino) bzw. Python (.py) Programm überarbeitet werden muss.

Hinweis zur Programmerstellung

Da das Erstellen der Programme sehr zeitaufwendig ist, wird dies auf Claude ausgelagert. Um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, werden die Programme immer wieder auf die korrekte Funktion getestet und mittels eines iterativen Prozesses weiter optimiert.

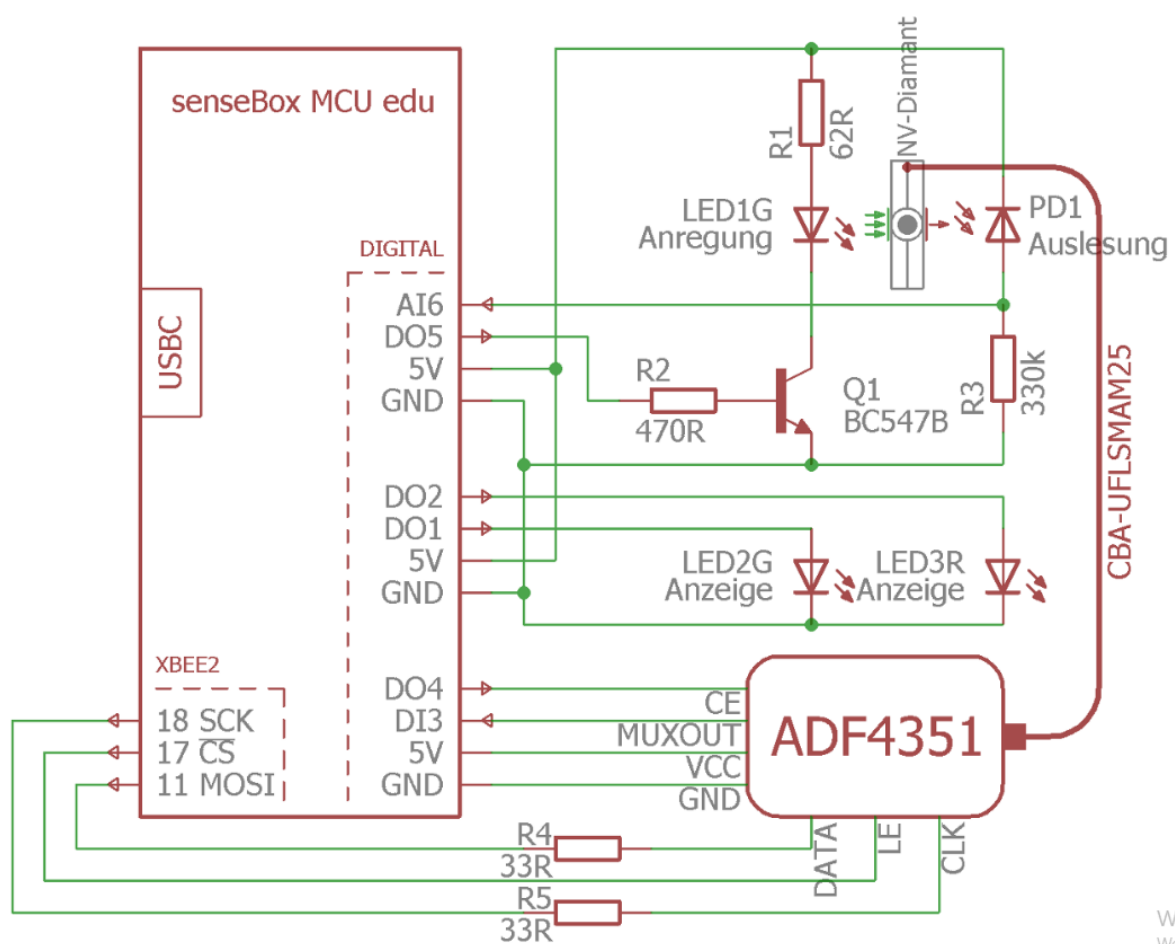


Abbildung 3.2: Schaltplan von Qoool [6], der mit der senseBox funktionieren sollte

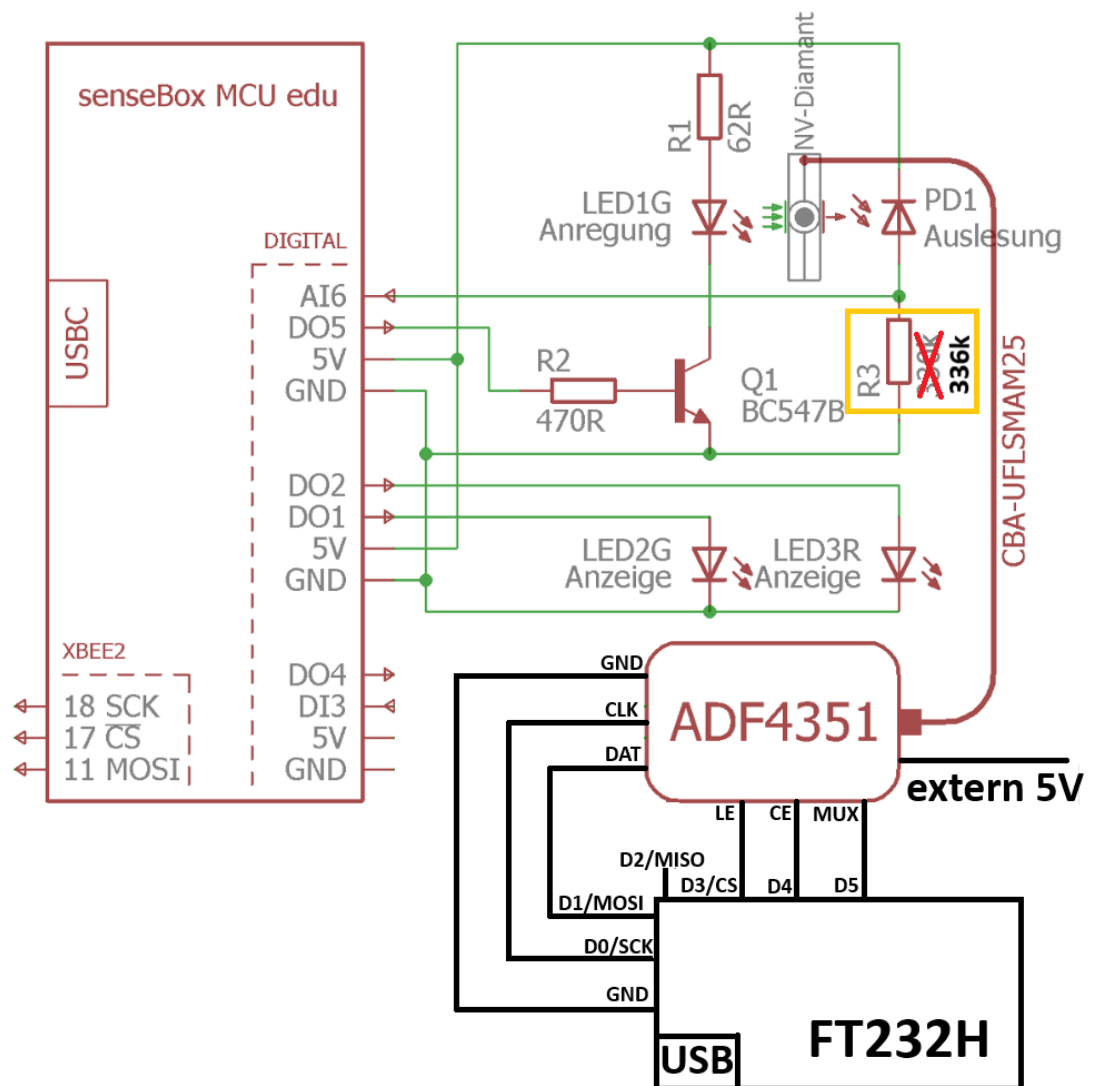


Abbildung 3.3: Angepasster Schaltung, der für die Verwendung eines FT232H Adapters ausgelegt ist [6]

3.2.1 Arduino IDE

Um das Arduino-Programm nutzen zu können, muss zuerst die Programmierumgebung Arduino IDE installiert werden. Zusätzlich müssen die folgenden Punkte beachtet werden, um auf die senseBox zugreifen zu können.

Für die Installation und Inbetriebnahme der senseBox mit Arduino IDE gibt es auf GitHub eine praktikable Anleitung [8]. Hierfür sollten die Schritte 1 bis 4 durchgeführt werden. Hierbei sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Die Installation der beiden Pakete "Arduino SAMD Boards by Arduino" und "senseBox SAMD Boards by senseBox" aus Schritt 2 ist zwingend erforderlich
- Zum Kompilieren des Programms muss zuvor das korrekte Board ausgewählt werden. Dies kann man wie in Schritt 4 handhaben. Alternativ kann man das Board direkt mit dem PC verbinden und das korrekte Board mit dem dazugehörigen COM-Anschluss rechts neben dem Kompilierbutton auswählen (siehe Abbildung 3.4).

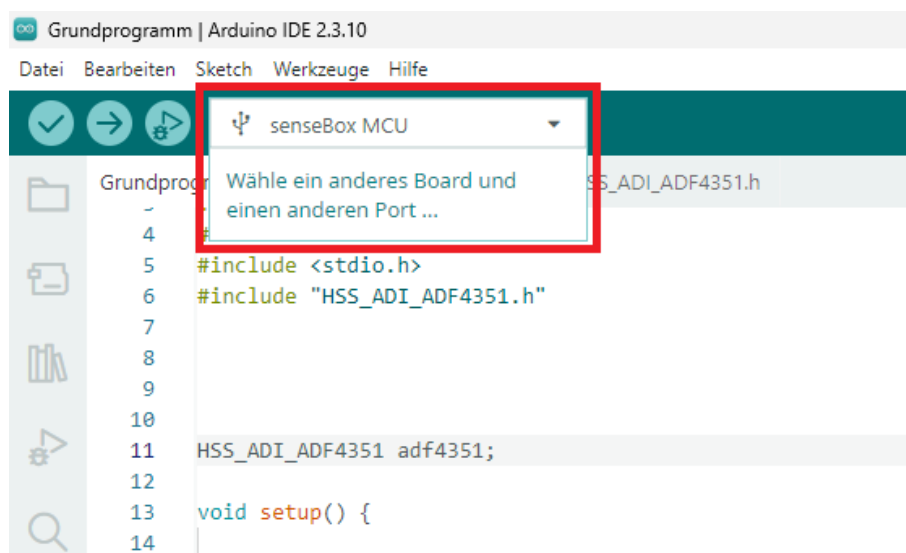


Abbildung 3.4: Einfache Möglichkeit zur Bestimmung des Boards und des dazugehörigen COM-Anschlusses.

Programme

Das Programm für Arduino (.ino) ist für die Steuerung der senseBox zuständig. Es initialisiert die senseBox und führt anschließend die Wandlung aus. Zusätzlich ist es für die Ansteuerung folgender drei LEDs (siehe Abbildung 3.3) zuständig:

- LED1G Anregung: Wird nach Initialisierung dauerhaft angesteuert, um das NV-Zentrum mit grünem Licht anzuregen.
- LED2G Anzeige: Wird angesteuert, sobald der komplette Messzyklus (Plot wird angezeigt) abgeschlossen ist. Wird erst nach Beginn einer neuen Messung abgeschaltet.

- LED3R Anzeige: Wird angesteuert, sobald ein Messpunkt nicht erstellt werden konnte. Wird erst nach Beginn einer neuen Messung zurückgesetzt.

Wichtiger Hinweis: Damit die .ino-Datei geöffnet werden kann, muss sich die Datei in einem Ordner mit dem Namen "Grundprogramm" befinden (siehe Abbildung 3.5).

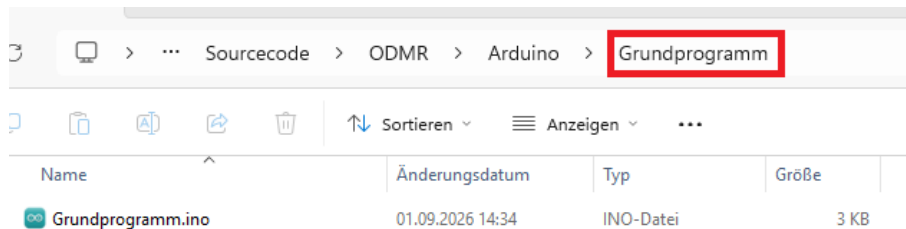


Abbildung 3.5: Ordnerbezeichnung muss mit "Grundprogramm" hinterlegt sein, da Arduino IDE die .ino-Datei sonst nicht öffnen kann

3.2.2 Python

Um Python zu nutzen, wird die Umgebung Visual Studio Code (VS) verwendet. Nach der Installation von VS und Python müssen noch zusätzliche Pakete installiert werden. Damit die neuen Pakete keinen systemweiten Einfluss haben, wird eine virtuelle Python Umgebung mithilfe eines .venv Ordners (in dem die Pakete installiert werden) geschaffen.

Virtuelle Umgebung schaffen

Im Folgenden wird beschrieben, wie eine virtuelle Umgebung geschaffen werden kann.

1. Oben in der Kommandozeile ">Environment" eingeben und "Python: Create Environment..." wählen (siehe Abbildung 3.6).

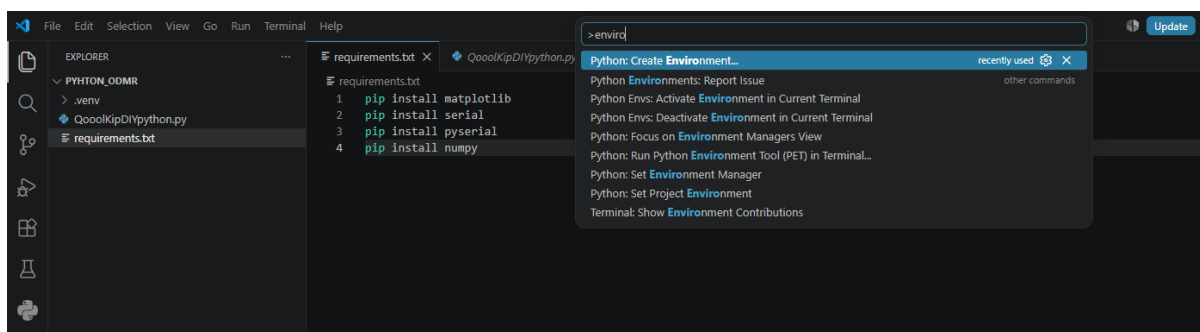


Abbildung 3.6: Virtuelle Umgebung in Python erstellen

2. Zeile "venv" wählen.
3. "Python X.XX.XX C:..." wählen (X.XX.XX steht für die Version und C: stellt den Speicherpfad dar).
4. Name wählen. Hier bietet sich ".venv." an.
5. "Skip package installation" wählen. Dies wird später manuell durchgeführt.

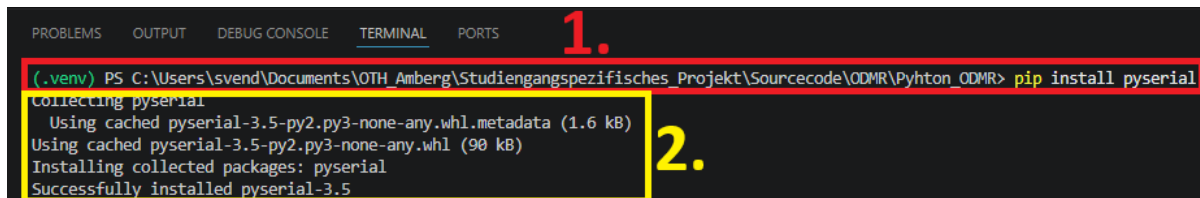
Hinweis

Nach Erstellung des .venv-Ordners sollte dieser nicht mehr verschoben werden, da sonst der Speicherpfad nicht mehr erkannt wird.

Pakete manuelle installieren

Nachdem die virtuelle Python Umgebung geschaffen wurde, lassen sich die einzelnen Pakete wie folgt installieren:

1. Über Terminal ein neues "New Terminal" öffnen. Danach sollte ein Eingabefenster geöffnet werden, das "Terminal" heißt.
2. Jetzt sollte bereits ein Speicherpfad hinterlegt sein. Sollte dieser nicht angezeigt werden, dann kann mit dem Befehl "exit()" wieder zurückgewechselt werden. Nach diesem Speicherpfad muss das gewünschte Paket mit "pip install Paketname" installiert werden (siehe Abbildung 3.7).
3. Danach wird das benötigte Paket automatisch installiert.



```
(.venv) PS C:\Users\svend\Documents\OTH_Amberg\Studiengangspezifisches_Projekt\Sourcecode\ODMR\Python_ODMR> pip install pyserial
Collecting pyserial
  Using cached pyserial-3.5-py2.py3-none-any.whl.metadata (1.6 kB)
  Using cached pyserial-3.5-py2.py3-none-any.whl (90 kB)
Installing collected packages: pyserial
Successfully installed pyserial-3.5
```

Abbildung 3.7: Pakete manuell installieren.

1. Eingabe des Befehls "pip install pyserial"
2. automatische Ausführung nach dem Befehl

Es werden folgende Pakete benötigt:

- pip install matplotlib
- pip install serial
- pip install pyserial
- pip install numpy

Steuerung des Mikrowellengenerators (adf4351_ft232h_lib.py)

Nachdem die virtuelle Python Umgebung geschaffen wurde, kann das Programm für die Steuerung des ADF4351 Mikrowellengenerators dort abgelegt werden.

Da im Versuchsaufbau ein FT232H Adapter anstelle der senseBox zur Kommunikation mit dem ADF4351 verwendet wird, können die ADF4351-Treiber von Qoool [6] nicht genutzt werden. Deshalb wird das Programm mit dem Namen "adf4351_ft232h_lib.py" erstellt und genutzt. Dessen Hauptaufgabe ist die korrekte Ansteuerung des Mikrowellengenerators, indem er die benötigten Registerwerte (z.B. Teiler, Ausgabefrequenz, etc.) automatisch berechnet. Hierfür muss lediglich die Funktion set_frequency_mhz(Übergabewert) aufgerufen werden. Um das Programm von einem anderen Python Skript aufzurufen, wird der Befehl adf.set_frequency_mhz (Übergabewert) genutzt. Der Übergabewert

kann auch als Gleitkommazahl (float) angegeben werden und hat die Einheit MHz.

Nutzungsbeispiel: Ein Aufruf des Befehls `adf.set_frequency_mhz(2845.4)` führt zu einer Ausgabe von 2845.4 MHz am Ausgang des Mikrowellengenerators.

Einfache Messung (QoolKipDIYpython.py)

Da nun das Ansteuern des Mikrowellengenerators möglich ist, kann auf dessen Grundlage ein einfaches Messprogramm zur Erstellung eines Fluoreszenzspektrums erstellt werden.

Hierfür wird als Grundgerüst das gegebene Programm von Qool [6] genutzt. Hierbei gibt es eine wichtige große Änderung. Im Ursprungsprogramm fand zwischen der `senSeBox` und dem Mikrowellengenerator eine Kommunikation über eine SPI-Schnittstelle statt. Das wird jedoch nicht mehr benötigt, da die Kommunikation auf den FT232H Adapter in einem anderen Skript ausgelagert wurde. Im angepassten Programm wird lediglich die benötigte Frequenz berechnet und mit `adf.set_frequency_mhz` (Übergabefrequenz) an das zuständige Skript übergeben (siehe Abschnitt 3.2.2).

Um das `QoolKipDIYpython.py` Programm nutzen zu können, muss der richtige Port hinterlegt werden (siehe Abbildung 3.8). Sollte dieser nicht bekannt sein, kann dieser am einfachsten mit Arduino IDE herausgefunden werden. Hierfür muss die Schaltfläche "Werkzeuge" angewählt werden. Nun kann man im Unterpunkt "Port:" den richtigen ablesen. In diesem Fall handelt es sich um "COM3".

Zusätzlich kann unter der Variable `SAVE_DIR` ein Speicherpfad angegeben werden, damit eine Text-Datei (.txt) mit allen gemessenen Punkten selbständig gespeichert wird. Zusätzlich wird diese Ordnerstruktur automatisch beim Speichern des Plots aufgerufen.

Um die durchlaufene Bandbreite des Mikrowellengenerators einzustellen, stehen die beiden Variablen `decFreqBeg` (Startfrequenz) und `decFreqEnd` (Endfrequenz) zur Verfügung. Die Anzahl der Frequenzschritte wird durch `decNumSteps` bestimmt (siehe Abbildung 3.8). Um die Breite zwischen den einzelnen Schritten zu berechnen, nutzt man die folgende Formel.

$$\text{Frequenzschrittbreite} = \frac{\text{decFreqEnd} - \text{decFreqBeg}}{\text{decNumSteps}} \quad (3.2)$$

```

import os
import time
import decimal
import datetime

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import serial

import adf4351_ft232h_lib as adf

# --- Einstellungen ---
COM_PORT = "COM3"          # richtiger Port zuweisen (hier COM3)
BAUDRATE = 115200

SAVE_DIR = r"C:\Users\svend\Documents\OTH_Amberg\Studiengangspezifisches_Projekt\Messdaten" # hier deinen gewünschten Speicherordner eintragen

decFreqBeg = decimal.Decimal('2670') # Startfrequenz in MHz
decFreqEnd = decimal.Decimal('3070') # Stopfrequenz in MHz
decNumSteps = decimal.Decimal('200') # Anzahl Schritte
intNumValAdc = int(100) # Anzahl ADC-Werte pro Mittelung

LOCK_SETTLE_S = 0.002 # kurze Wartezeit nach Frequenzwechsel vor Lock-Check

```

Abbildung 3.8: Codeausschnitt aus dem Pythoncode für die einfache Messung. Für diese Einstellung ergibt sich nach der Gleichung 3.2 eine Schrittbreite von 2MHz

Mittelwertbildner (QoolKipDIYpython_avg-2.py)

Bei der späteren Durchführung im Abschnitt 3.4.1 wird deutlich, dass die einfache Messung aufgrund von Hintergrundrauschen zu ungenau wird. Deshalb bietet es sich an, dass Programm um einen Mittelwertbildner mit einer Standardabweichung zu erweitern.

Wie beim Vergleich von Abbildung 3.8 und 3.9 deutlich wird, sind die Variablen bis auf MEASUREMENTS_PER_VISIT und NUM_CYCLES identisch. MEASUREMENTS_PER_VISIT gibt an, wie viele Messpunkte während eines Messzyklus entstanden sind. NUM_CYCLES gibt an, wie viele Messzyklen durchlaufen werden. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{Messpunktzahl} = \text{NUM_CYCLES} * \text{MEASUREMENTS_PER_VISIT} \quad (3.3)$$

```

# --- Einstellungen ---
COM_PORT = "COM3"          # weiterhin die senseBox - nur noch fuer den ADC
BAUDRATE = 115200

SAVE_DIR = r"C:\Users\svend\Documents\OTH_Amberg\Studiengangspezifisches_Projekt\Messdaten" # hier dein

decFreqBeg = decimal.Decimal('2670') # Startfrequenz in MHz
decFreqEnd = decimal.Decimal('3070') # Stopfrequenz in MHz
decNumSteps = decimal.Decimal('200') # Anzahl Schritte
intNumValAdc = int(100) # Anzahl ADC-Werte pro einzelner Abfrage (Mittelung in der sense

MEASUREMENTS_PER_VISIT = 10 # wie oft ein Punkt hintereinander gemessen wird, waehrend man dort steht
NUM_CYCLES = 1 # wie oft der komplette Frequenzbereich zyklisch durchlaufen wird

```

Abbildung 3.9: Codeausschnitt aus dem Pythoncode zum Mittelwertbildner

Beispiel: Wenn für MEASUREMENTS_PER_VISIT=3 und NUM_CYCLES=2 gewählt wird, passiert während der Messung folgendes:

Zyklus 1:

3 Messungen an Messpunkt 1,
3 Messungen an Messpunkt 2,
...
3 Messungen am letzten Messpunkt
Zyklus 2:
3 Messungen an Messpunkt 1,
3 Messungen an Messpunkt 2,
...
3 Messungen am letzten Messpunkt
Nach Zyklus 2:

Somit ergeben sich für alle Messpunkte 6 Messwerte (nach Gleichung 3.3 ergibt sich $2 \cdot 3 = 6$). Aus diesen 6 Messwerten wird im Anschluss für jeden Messpunkt der Mittelwert und die Standardabweichung (Std) errechnet und im Anschluss geplottet.

3.3 Funktionsweise

Ziel einer Messung ist es, ein Fluoreszenzspektrum auszugeben und dieses Auszuwerten. Ein Spektrum ist in der Wissenschaft eine Intensitätsverteilung von bestimmten Eigenschaftswerten, die als Funktion dargestellt werden. Die Eigenschaften sind beim Fluoreszenzspektrum die Fluoreszenzintensität, die in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt werden. Ein solches Spektrum entsteht in der ODMR aufgrund folgendes Vorgangs. Zur Veranschaulichung werden die eingestellt Werte in Abbildung 3.8 genutzt.

Zu Beginn wird ein NV-Zentrum dauerhaft mit grünen Licht bestrahlt. Durch quantenmechanische Eigenschaften wird rotes Licht emittiert (vergleiche Kapitel 1.2). Wird der Messvorgang gestartet, dann wird zum einen die senseBox initialisiert und zum anderen die Schrittweite gemäß der Gleichung 3.2 berechnet. Hierfür würde sich im Beispiel eine Schrittweite von 2 MHz ergeben.

Im nächsten Schritt, wird mit der Messung bei 2670 MHz (decFreqBeg) begonnen. Diese Frequenz wird mithilfe des Befehls `adf.set_frequency_mhz(2670)` an das Steuerskript für den Mikrowellengenerator übergeben. Dieses Skript berechnet und leitet die korrekten Registerwerte über eine FT232H Adapter an den ADF4351 Mikrowellengenerator weiter. Folglich stellt dieser Generator die 2670 MHz am Ausgang zur Verfügung, die wiederum mit einem CBA-UFLSMAM25 Koaxialkabel an den Resonator beim NV-Zentrum weitergegeben werden. Da in diesem Versuch noch kein Magnetfeld anliegt (was die Resonanzfrequenz des NV-Zentrums verschieben könnte), emittiert das NV-Zentrum die gleiche Menge an rotem Licht.

Dieses Licht wird von der Fotodiode in einen Fotostrom umgewandelt und durch den Widerstand R3 geleitet, der es wiederum in eine Spannung umwandelt. Diese wird im Anschluss von der senseBox quantisiert (stellt die Fluoreszenzintensität dar) und mit der Frequenz von 2670 MHz in einer .txt Datei gespeichert. Damit ist der erste Messpunkt abgeschlossen.

Im nächsten Schritt wird die Schrittweite von 2 MHz auf die zuletzt gemessenen Frequenz von 2670 MHz aufaddiert. Es ergibt sich nun eine Frequenz von 2672 MHz, die

wieder an den Befehl `adf.set_frequency_mhz(2672)` übergeben wird und der Vorgang startet von vorne. Dies wird so lange durchgeführt, bis mit der Frequenz 3070 MHz (`decFreqEnd`) ein letzter Durchlauf gestartet wird. In einer idealen Umgebung, bleibt die Fluoreszenzintensität während der gesamten Messung, ausgenommen im Bereich der Resonanzfrequenz, gleich. Im Resonanzbereich ist ein Einbruch in der Intensität zu erwarten (siehe Kapitel 1.5).

Nachdem der letzte Messpunkt abgehandelt wurde, wird ein Plot erstellt, der alle Punkte miteinander verbindet. Ein Fluoreszenzspektrum ist entstanden, das die Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit von der Frequenz angibt. Hier ist ein gleichbleibender Funktionsverlauf mit einem Einbruch bei der Resonanzfrequenz 2,87 MHz zu erwarten.

3.4 Ergebnisse und Durchführung

3.4.1 Messung der Nullfeldaufspaltung

In diesem Abschnitt wird das NV-Zentrum mit Mikrowellen bestrahlt. Gleichzeitig liegt kein Magnetfeld am NV-Zentrum an. Ziel ist es, die sogenannte Nullfeldaufspaltung bei 2,87 GHz sichtbar zu machen.

Beobachtungen

- Die Fluoreszenzintensität bleibt außerhalb der Resonanzfrequenz nahezu konstant. Hierbei pendelt sie um einen Mittelwert mit Abweichungen von ein bis zwei Dekaden in beide Richtungen. Dies kann beispielsweise an Abbildung 3.10 erkannt werden. Hier findet sich ein größerer Ausschlag bei 3040 MHz und es kann dort eine maximale Intensität von 25219 a.u. und eine minimale von 25193 a.u. abgelesen werden. Daraus ergibt sich ein Intensitätsunterschied von 26 a.u.
- Im Bereich der Resonanzfrequenz (bei 2,87 GHz) findet sich ein Einbruch der Resonanzfrequenz. Dieser beginnt in Abbildung 3.10 bei 2,85 GHz und endet bei 2,89 GHz. Die gleichen Werte können auch bei Abbildung 3.11 abgelesen werden.
- Der Intensitätseinbruch ähnelt hierbei einem "W". Wobei die Einbruchstiefe der beiden Minima unterschiedlich ist (siehe Abbildung 3.10).
- Die Einbruchsstärke ist auch in den Messungen unterschiedlich. In der Abbildung 3.10 bricht die Intensität maximal um 25 a.u., ein während der Einbruch aus Abbildung 3.11 mit 40 a.u. um den Faktor 1,6 stärker ist.

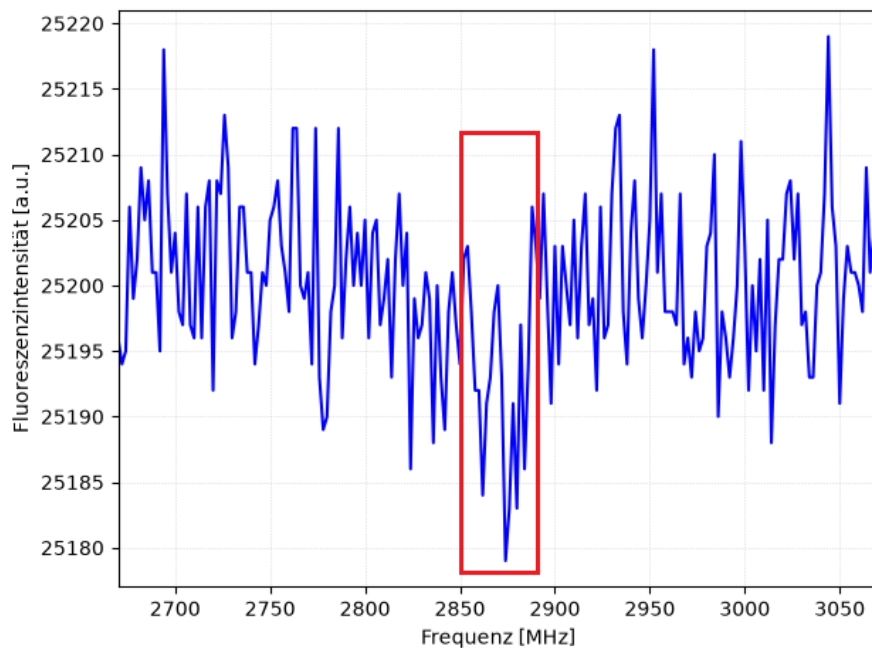


Abbildung 3.10: Nullfeldaufspaltung (rote Box): Erkennbar an den charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität im Bereich von 2,87 GHz

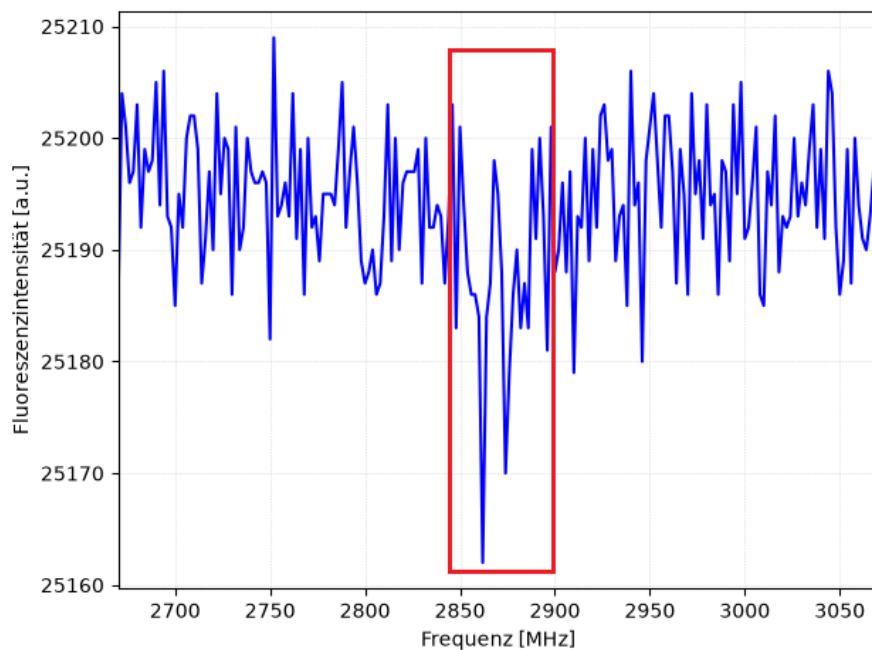


Abbildung 3.11: Nullfeldaufspaltung (rote Box): Erkennbar an den charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität im Bereich von 2,87 GHz

Schlussfolgerung

Aus der ersten Beobachtung kann man schließen, dass es sich beim Pendeln um einen Mittelwert um gewöhnliches Rauschen handelt. Dies ist bei genauen und hochauflösenden Messungen normal.

Der Einbruch der Fluoreszenzintensität zwischen 2,85 GHz und 2,89 GHz ist zu erwarten, da sich in diesem Bereich die Resonanzfrequenz von 2,87 GHz befindet. Wie im Kapitel 1.5 erläutert wird, führt diese Resonanzfrequenz zu einer Reduzierung des emittierten roten Lichtes. Da die Stärke dieses Lichtes mit der Fotodiode indirekt gemessen wird, verringert sich auch die Fluoreszenzintensität bei den Messungen.

Dass sich die Stärke der Einbrüche in den unterschiedlichen Messungen um den Faktor 1.6 unterscheiden, kann einfach mit dem Rauschen erklärt werden. Im ersten Stichpunkt der Beobachtungen wurde ein Intensitätsunterschied von 26 a.u. ermittelt. Daraus ergibt sich eine Toleranz von ± 13 um einen Mittelpunkt. Somit ergeben sich mit den Informationen aus dem letzten Stichpunkt folgende Werte:

25 ± 13 a.u. für Abbildung 3.10

40 ± 13 a.u. für Abbildung 3.11

Durch die Toleranz ergibt sich ein Überlappungsbereich von 27-38 a.u. in dem sich der tatsächliche Wert für die Fluoreszenzintensität befinden muss. Somit lässt sich auch der Faktor 1,6 zwischen den beiden Messungen erklären.

3.4.2 Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildner

Im letzten Abschnitt wurde deutlich, dass das Rauschen teilweise einen sehr großen Einfluss auf das Messergebnis hat. Deshalb wird die Messung mit einem modifizierten Programm wiederholt, das mehrere Messzyklen mit mehreren Messpunkten durchläuft und im Anschluss einen Mittelwert mit einer Standardabweichung (Std) ausgibt.

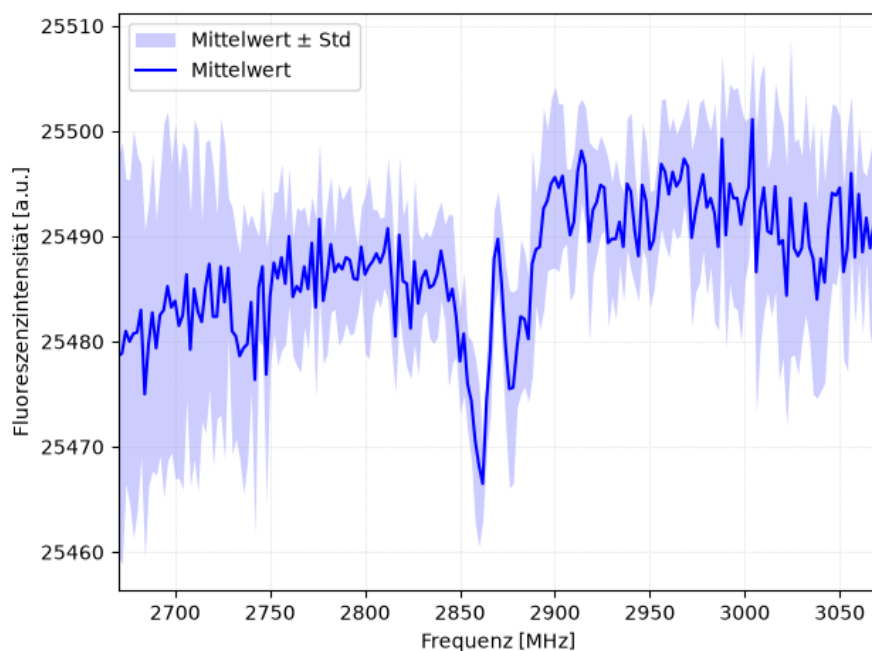


Abbildung 3.12: Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildung (Messparameter: 1 Zyklus, 5 Messwerte)

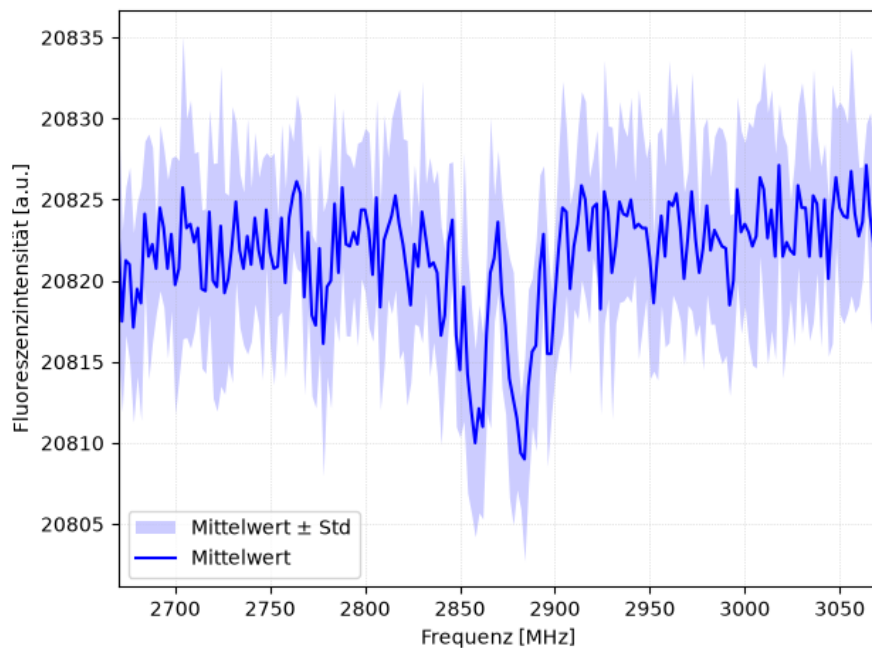


Abbildung 3.13: Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildung (Messparameter: 2 Zyklus, 5 Messwerte)

Beobachtungen und Schlussfolgerungen

Die Standardabweichung zeigt, dass das starke Rauschen noch vorhanden ist. Durch den Mittelwertbildner wird es in Abbildung 3.12 auf 10 a.u. und in 3.13 auf 6 a.u. reduziert. Vergleichsweise betrug dieser Wert bei den einfachen Messungen bis zu 26 a.u.. Damit ergibt sich eine Verbesserung um den Faktor 2,6 bzw. 4,3

Der Intensitätseinbruch bei 2,87 GHz ist im Gegensatz zur einfachen Messung deutlich zu erkennen. In Abbildung 3.13 zeigt sich eine nahezu perfekte "W-Form".

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Mittelwertbildner eine sinnvolle Erweiterung des Messverfahrens darstellt.

Kapitel 4

Meilenstein 3: Magnetfeldmessung an einem Gleichstrommotor

4.1 Versuchsentwurf

Ziel

Ziel ist die Bestimmung der magnetischen Flussdichte mit einem NV-Zentrum. Dabei werden zwei Messreihen mit unterschiedlicher Positionierung des NV-Zentrums angefertigt, wobei eine Messreihe aus mehreren Messungen mit unterschiedlichen vorher definierten Strömen durch die Erregerwicklung eines Gleichstrommotors besteht. Nach den Messungen werden die entstandenen Spektren ausgewertet, um draus die magnetische Flussdichte zu berechnen und zu interpretieren.

Versuchsaufbau

Für die Platzierung des NV-Zentrums ergeben sich zwei unterschiedliche Positionen (siehe Abbildung 4.1):

Option 1: Messung direkt bei den Wicklungen. Hier sollte das Magnetfeld am einfachsten zu messen sein, da die Wicklungen es direkt aussenden. Die Befestigung sollte etwas komplexer sein (außer beim Drauflegen auf die Plexiglasplatte), da der Sensor über den Spulen "schweben" müsste.

Option 2: Messung bei den Kohlebürsten. Hier ist die Schwierigkeit der Messung nicht vorherzusagen, da Komponenten (z.B Kohlebürsten) das Magnetfeld abblocken oder abschwächen können. Die Befestigung des Sensors ist einfacher zu realisieren, da hier bereits eine kleine Erhöhung zum Ablegen des Klemmbretts reicht.

Versuchsdurchführung und Auswertung

Es werden mehrere unterschiedliche Magnetfeld mit dem NV-Zentrum gemessen. Hierfür wird ein Gleichstrommotor angesteuert. Der Motor beinhaltet zum einen eine Ankerwicklung und zum anderen eine Erregerwicklung. Um ein konstantes Magnetfeld zu erzeugen, wird mithilfe einer Stromquelle ein vorher definierter Erregerstrom eingepreßt. Es ist dabei zu beachten, dass die Ankerwicklung nicht angeschlossen wird und dass diese somit kein Magnetfeld erzeugt und sich auch nicht dreht. Die Stärke der erzeugten Magnetdichte ist von Faktoren wie der Entfernung zwischen

Spule und NV-Zentrum abhängig oder durch die Höhe des Erregerstroms. Durch Variation können auch unterschiedliche magnetische Flussdichten gemessen werden. Jede Messung erzeugt ein Fluoreszenzspektrum, das im Anschluss ausgewertet wird. Hier ist ein linearer Zusammenhang zwischen Stromstärke und magnetischer Flussdichte zu erwarten und zu prüfen (z.B. Verdoppelung des Stroms sollte auch eine Verdopplung der gemessenen Flussdichte zur Folge haben).

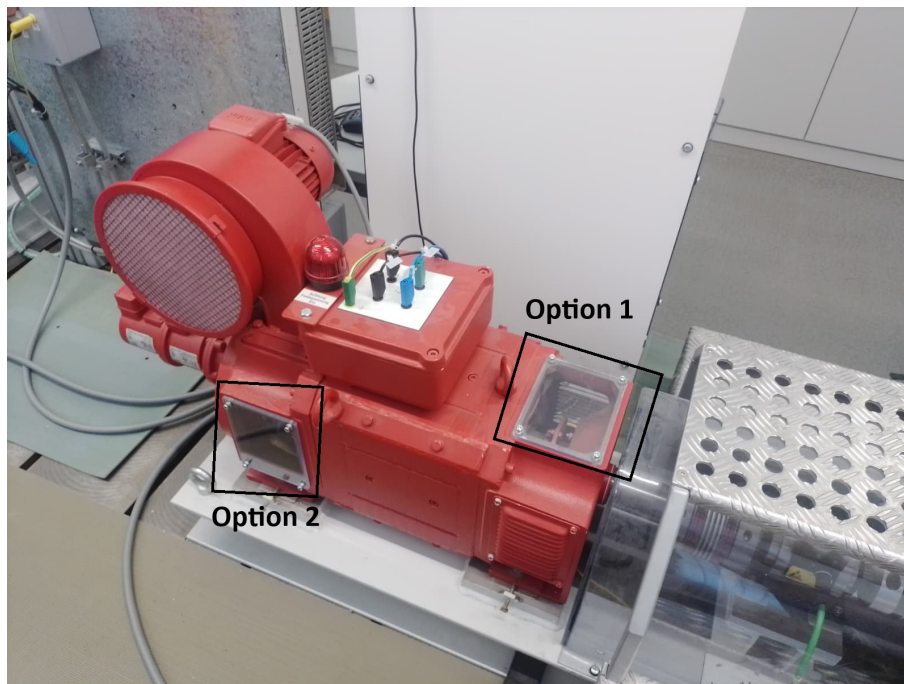


Abbildung 4.1: DC-Motor mit möglichen Messstellen

4.2 Befestigung

Wegen der Zugänglichkeit und mehreren Messoptionen (Abdeckungen auf der Seite ermöglichen weitere Messpunkte) wurde sich für Option 1 entschieden. Hierfür ist es erforderlich, dass eine passende Befestigung gebaut wird.

4.2.1 Skizzen

Nach dem Abbauen des Deckels (siehe Option 1 in Abbildung 4.1) wurde die Montageplatte vermessen. Dabei haben sich folgende Maße ergeben.

4.2.2 Anforderungen und Konstruktion

Nachdem der Montageort vermessen wurde, stellt sich die Frage, welche Kriterien die Konstruktion einhalten muss.

In der Wissenschaft ist es äußerst wichtig, dass Versuche, Messungen und Ergebnisse rekonstruierbar sein müssen. Deshalb gilt als oberste Priorität die Rekonstruierbarkeit

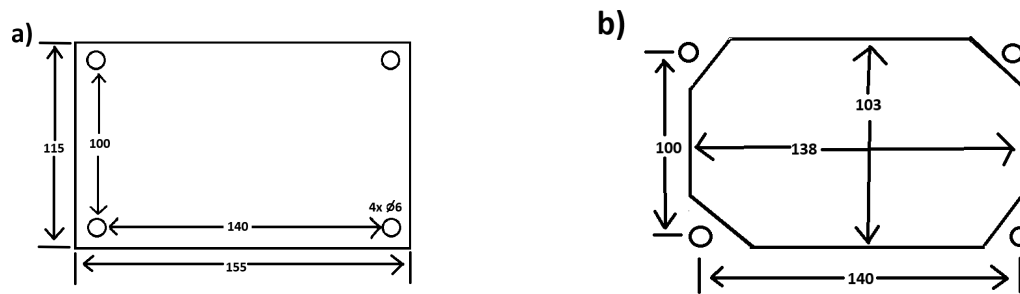


Abbildung 4.2: a) Skizze des Gehäusedeckels (Draufsicht) b) Skizze der Messstelle (Draufsicht)

der Messergebnisse. Dies hat zur Folge, dass das NV-Zentrum bei erneuter Versuchsdurchführung mit möglichst geringer Toleranz auf die gleiche Messposition eingestellt werden kann. Hierfür bietet sich eine Umsetzung über eine formschlüssige Positionierung mittels einer Hirth-Verzahnung an. Zusätzlich müssen die Bauteile wenig Gewicht tragen, weshalb die Möglichkeit des 3D-Drucks genutzt wird. Im Folgenden werden alle benötigten Bauteile beschrieben.

Bauteil 1 (siehe Abbildung 4.3)

Hier wird die erste Hirth-Verzahnung verwendet. Dafür wird die Abdeckung vom Motor entfernt und eine kreuzförmige Halterung erstellt. Da an der Messstelle wenig Platz ist, werden zusätzlich noch Abstandsbuchsen an der Kreuzhalterung angebracht. Auf der gleichen Seite wird eine Hälfte der Hirth-Verzahnung angebracht.

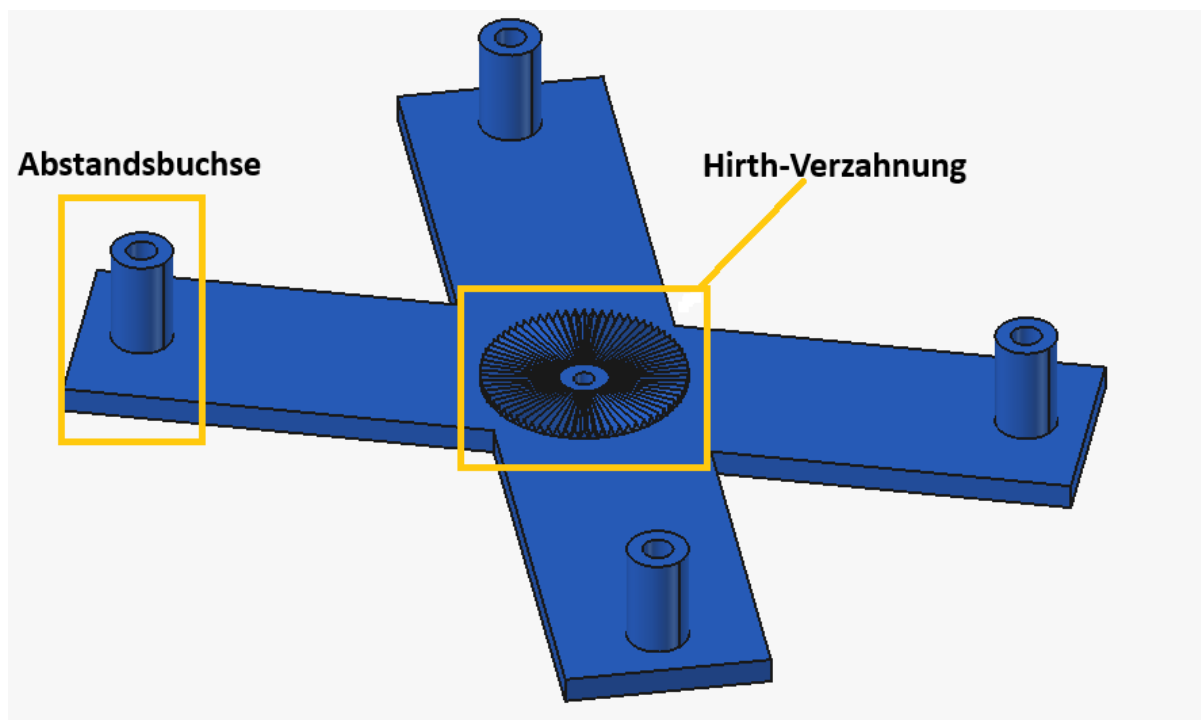


Abbildung 4.3: CAD-Zeichnung vom Hirth-Kreuz

Bauteil 2 (siehe Abbildung 4.4)

Hierfür wird die zweite Hälfte der Hirth-Verzahnung als Grundlage genutzt. Die Oberseite ist die Seite mit den Zähnen. Auf der Unterseite wird eine weitere Buchse angebracht. In der Innenseite wird eine 6-Kantfläche gedruckt. Dies dient dazu, dass man die Schrauben problemlos mit einer Mutter kontern kann. Zusätzlich wird seitlich von der Buchse noch ein Zapfen angebracht. An diesen Zapfen wird eine weitere Hirth-Verzahnung angebracht.

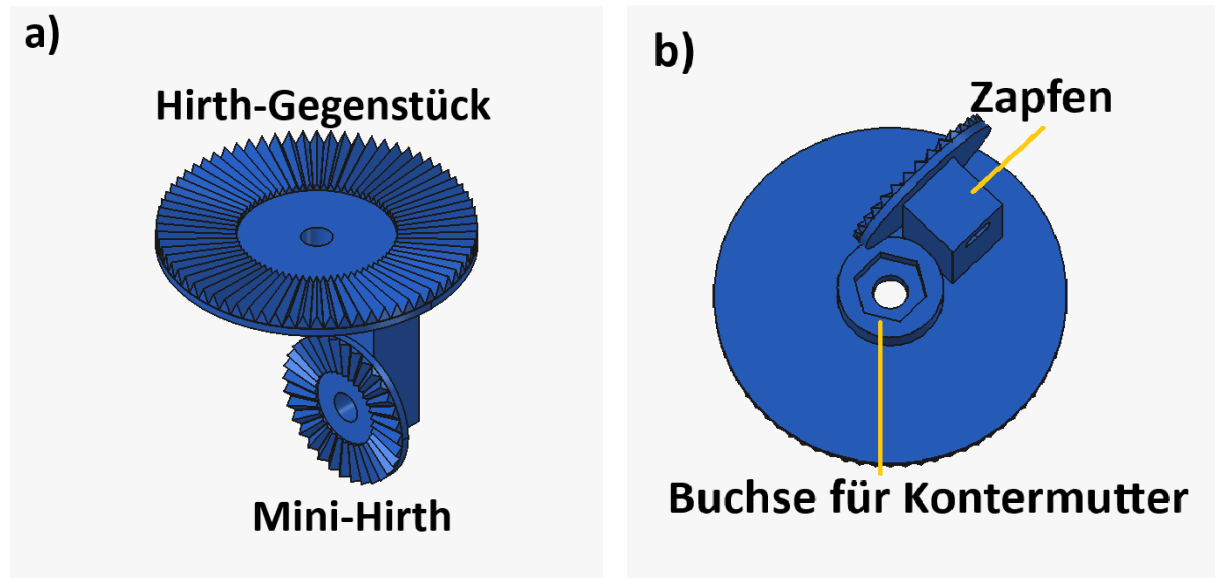


Abbildung 4.4: CAD-Zeichnung von Bauteil 2: a) Isometrische Ansicht b) Ansicht von unten

Bauteil 3 (siehe Abbildung 4.5)

Bauteil 3 ist wiederum das Gegenstück zum Mini-Hirth. Um dieses Bauteil mit Bauteil 2 verbinden zu können, wird auf der Rückseite eine weitere Buchse für eine Kontermutter platziert. Zusätzlich wird seitlich von der Buchse eine Stange angebracht. Auf der Unterseite der Stange befinden sich mehrere Zähne, mit denen später mittels einer Rastverzahnung die Länge verstellt werden kann. Diese Zähne werden so positioniert, dass falls erforderlich das Gegenstück (4.2.2) über die Buchse hinausragen kann (4.6). Deshalb darf die Verbindungsschraube zwischen Bauteil 2 und 3 in späteren Schritten nicht zu lang gewählt werden.

Bauteil 4 (siehe Abbildung 4.7)

Hierbei handelt es sich um das Gegenstück zu den Stangenzähnen aus Bauteil 3 (siehe Abbildung 4.5 und 4.6). Zusammen bilden sie eine sogenannte Rastverzahnung. Zusätzlich wurde noch ein Langloch hinzugefügt, um die beiden Bauteile miteinander zu verbinden. An einem Ende befindet sich eine Gabel. Mithilfe eines baugleichen Gegenstücks kann das Gehäuse des NV-Zentrums in der Gabel befestigt werden.

Anmerkung zur Konstruktion der Bauteile

Als Software wird FreeCAD verwendet. FreeCAD bietet die Option, dass eine automatische Konstruktion (Makro) nach einem Python-Programm durchgeführt werden

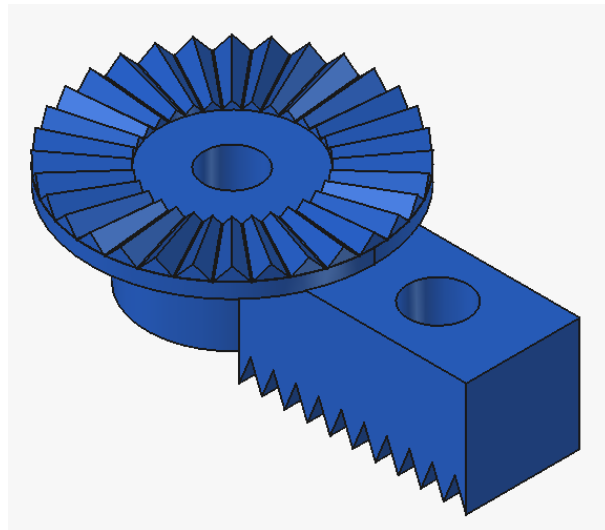


Abbildung 4.5: CAD-Zeichnung von Bauteil 3

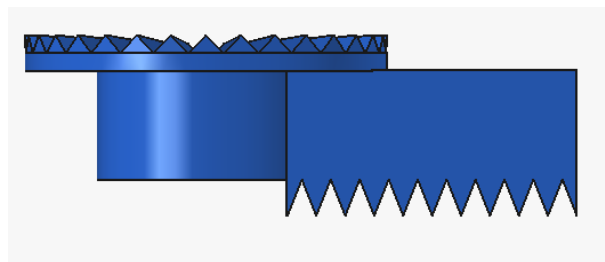


Abbildung 4.6: CAD-Zeichnung von Bauteil 3 mit Fokus auf die Zähne

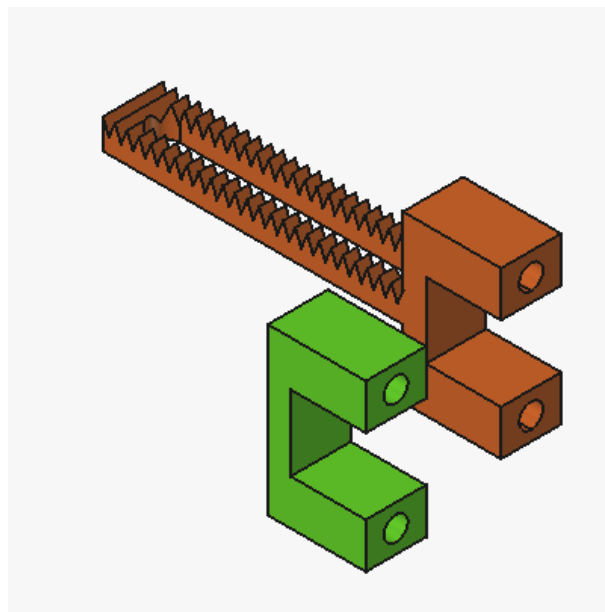


Abbildung 4.7: CAD-Zeichnung von Bauteil 4 mit Rastverzahnung mit Gabel (orange) und dazugehörigen Gegenstück der Gabel (grün)

kann. Diese Python-Programme wurde mithilfe von Claude erstellt und mittels eines iterativen Prozesses an die Anforderungen angepasst.

4.2.3 Montage

Nach dem erfolgreichen Druck aller Bauteile müssen diese mit zusätzlichem Verbrauchsmaterial zusammengebaut und montiert werden.

Verbrauchsmaterial

- 4x M5 Schraube Länge 30mm
- 3x M4 Mutter
- 2x M4 Schraube Länge 16mm
- 1x M4 Schraube Länge 20mm (besser 18mm)
- 2x M3 Mutter
- 2x M3 Schraube Länge 20mm

Anmerkung

Die Funktionen der Bauteile werden so beschrieben, dass das Kreuz horizontal am Motor befestigt wird.

Schritt 1 (siehe Abbildung 4.8)

Bauteil 1 wird mit Bauteil 2 mithilfe einer M4 Schraube (Länge 16mm) miteinander verbunden. Diese beiden Bauteile sorgen für einen einstellbaren Azimutalwinkel.

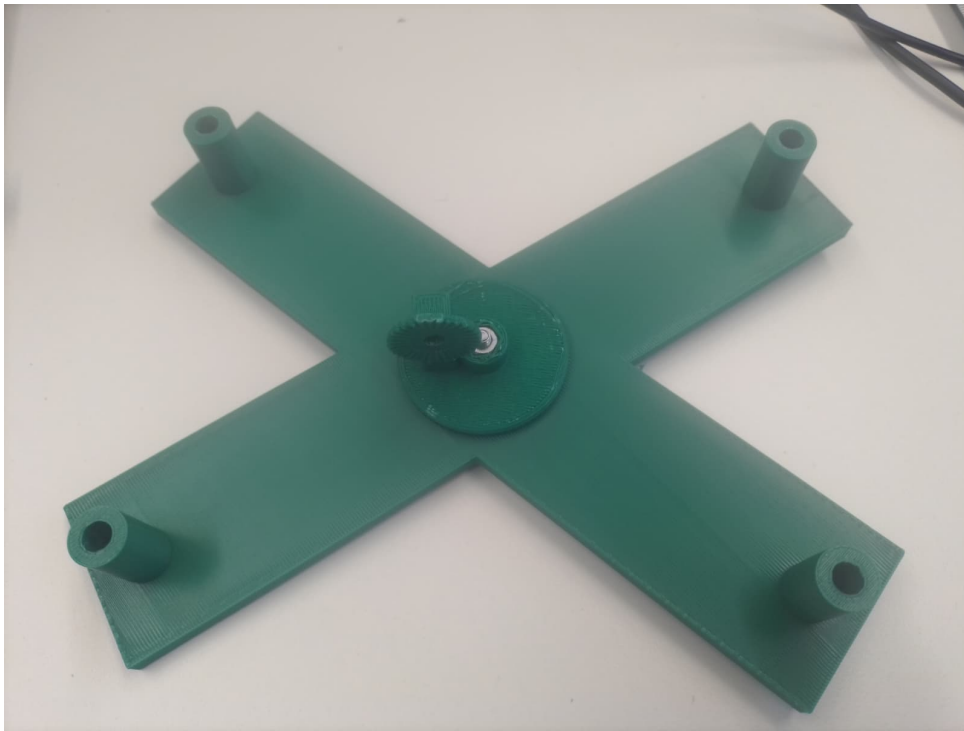


Abbildung 4.8: Halterung nach Schritt 1

Schritt 2 (siehe Abbildung 4.9)

Bauteil 2 wird mit Bauteil 3 mit einer M4 Schraube (Länge 20mm) befestigt. Da das Schraubenende leicht übersteht und somit Bauteil 4 beeinträchtigen kann, muss diese auf eine Länge von 18mm gekürzt werden. Dies kann beispielsweise mittels eines Bandschleifers durchgeführt werden. Auf eine korrekte Entgratung ist zu achten, damit die Mutter greifen kann und um das Verletzungsrisiko zu minimieren. Diese beiden Bauteile sorgen für einen einstellbaren Elevationswinkel.

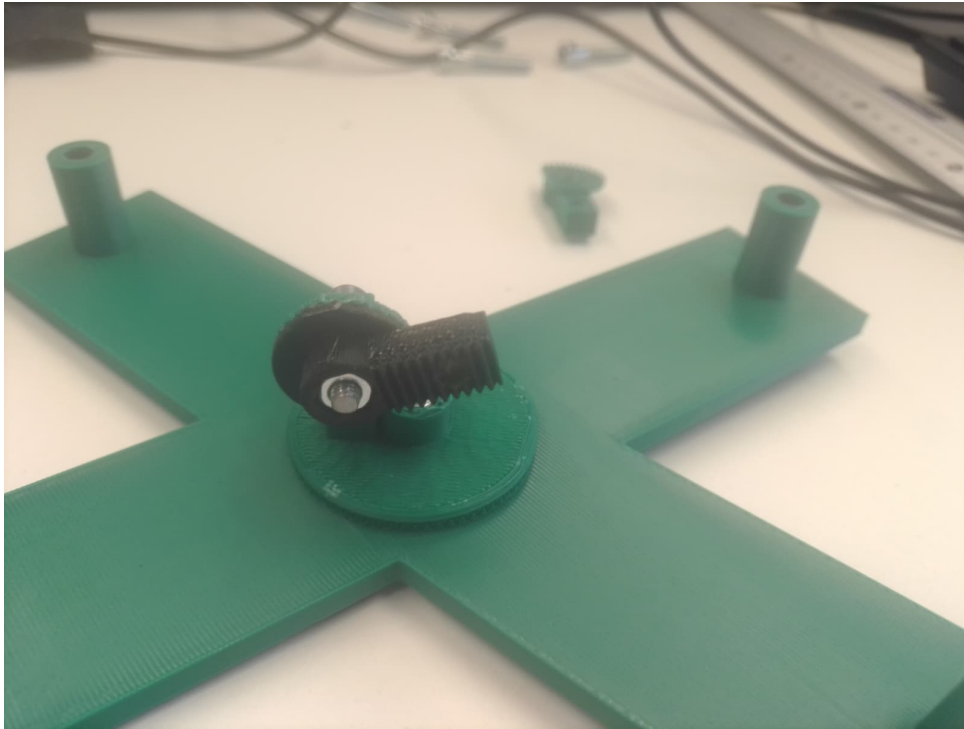


Abbildung 4.9: Halterung nach Schritt 2

Schritt 3 (siehe Abbildung 4.10)

Bauteil 3 wird mit Bauteil 4 mit einer M4 Schraube (Länge 16mm) befestigt. Diese beiden Bauteile sorgen für einen einstellbaren Abstand zur Motorwicklung.

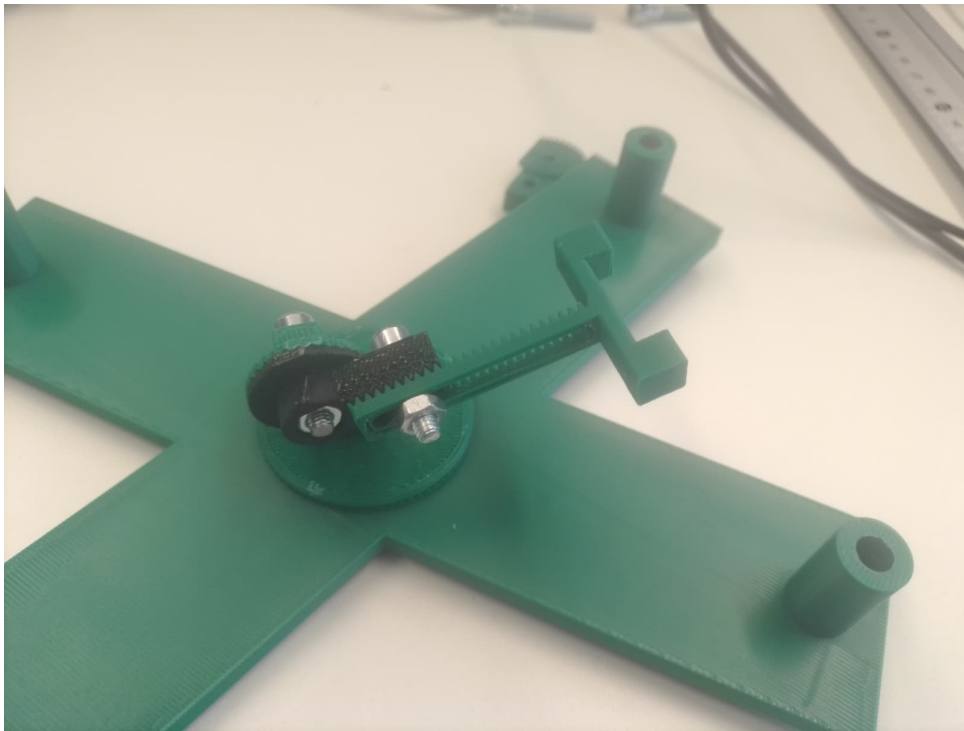


Abbildung 4.10: Halterung nach Schritt 3

Schritt 4 (siehe Abbildung 4.11)

Das Gehäuse zur Abdunkelung aus Meilenstein 1 und 2 kann nun mithilfe der beiden M3 Schrauben (Länge 20mm) in den Gabeln befestigt werden.



Abbildung 4.11: Halterung nach Schritt 4

Schritt 5 (siehe Abbildung 4.12 und 4.13)

Nachdem alles justiert wurde, kann die Baugruppe mithilfe der M5 Schrauben (Länge 30mm) auf dem Motor befestigt werden. Abbildung 4.12 zeigt die Vollständig montierte Baugruppe von außen und Abbildung 4.13 zeigt eine mögliche Positionierung des NV-Zentrums neben der Erregerwicklung des Gleichstrommotors.

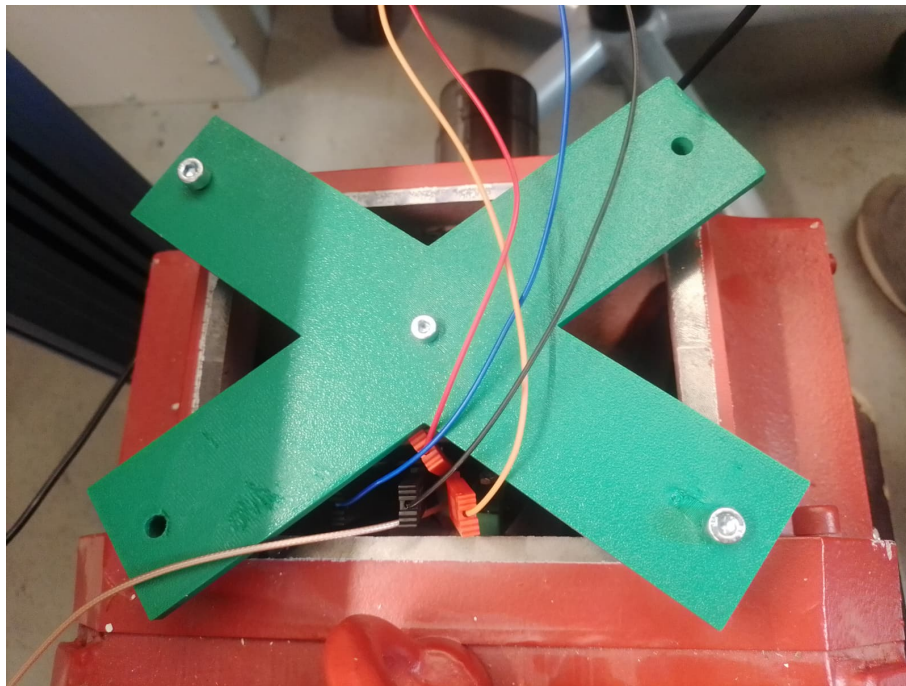


Abbildung 4.12: Halterung nach Schritt 5: Vollständig montierte Baugruppe von außen

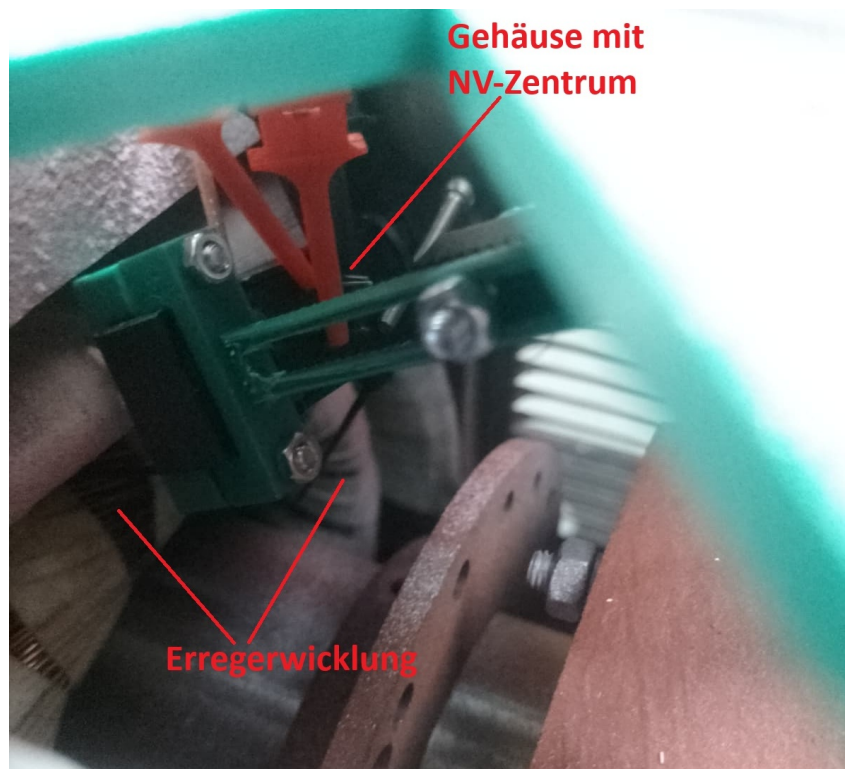


Abbildung 4.13: Halterung nach Schritt 5: Positionierung des NV-Zentrums neben der Erregerwicklung

4.3 Versuchsaufbau, Programme und Funktionsweise

Nach der Montage der Baugruppe stellt sich die Frage, welche zusätzlichen Änderungen im Versuchsaufbau und Programm durchgeführt werden müssen.

Im Versuchsaufbau muss lediglich darauf geachtet werden, dass die Anrege-LED und die Fotodiode mittels Verlängerungsleitungen korrekt mit dem Klemmbrett verbunden werden. Zusätzlich wird die Erregerwicklung an einer Gleichstromquelle angeschlossen.

Im Programmablauf ergeben sich keinerlei Änderungen. Deshalb kann auch die Funktionsbeschreibung vom ODMR-Versuch 3.3 verwendet werden.

Der einzige Unterschied befindet sich in der anschließenden Auswertung und Interpretation des Fluoreszenzspektrums. Im letzten Meilenstein wurde ein Einbruch der Fluoreszenzintensität bei 2870 MHz erwartet (Resonanzfrequenz). In diesem Meilenstein sind aufgrund des angelegten Magnetfeldes (das durch die Erregerwicklung des Gleichstrommotors entsteht) und dem daraus resultierenden Zeeman-Effektes ein Einbruch links und ein weiterer rechts von der Resonanzfrequenz zu erwarten (siehe Kapitel 1.5 und 1.6).

4.4 Ergebnisse und Durchführung

Sobald das NV-Zentrum positioniert wurde und die DC-Quelle angeschlossen ist, kann mit der Versuchsdurchführung begonnen werden.

Hierfür wird die Gleichstromquelle so eingestellt, dass der gewünschte Strom durch die Spule (Erregerwicklung) fließt. Im Anschluss wird die Messung gestartet. Daraus ergibt sich ein Fluoreszenzspektrum, das ausgewertet wird.

Anmerkung zum defekten Resonator

Nach der Montage im Motor konnten keine aussagekräftigen Messungen durchgeführt werden. Auch die Messung der Nullfeldaufspaltung war nicht mehr möglich. Grund hierfür war ein Leitungsbruch im Resonator. Durch den E-Mail-Kontakt mit Herrn Andre Bülau von Qoool, wurde bekannt, dass dies eine bekannte Schwachstelle des Versuches ist [2]. Um die Messung dennoch durchführen zu können wurde ein Stück Draht auf die betreffende Stelle gelötet (siehe Abbildung 4.14). Da der Kontakt immer wieder abgebrochen ist (meist beim Einbau, da sich der Resonator minimal im Gehäuse biegt), wurde der Resonator mit zwei Quadern im Gehäuse mechanisch fixiert.

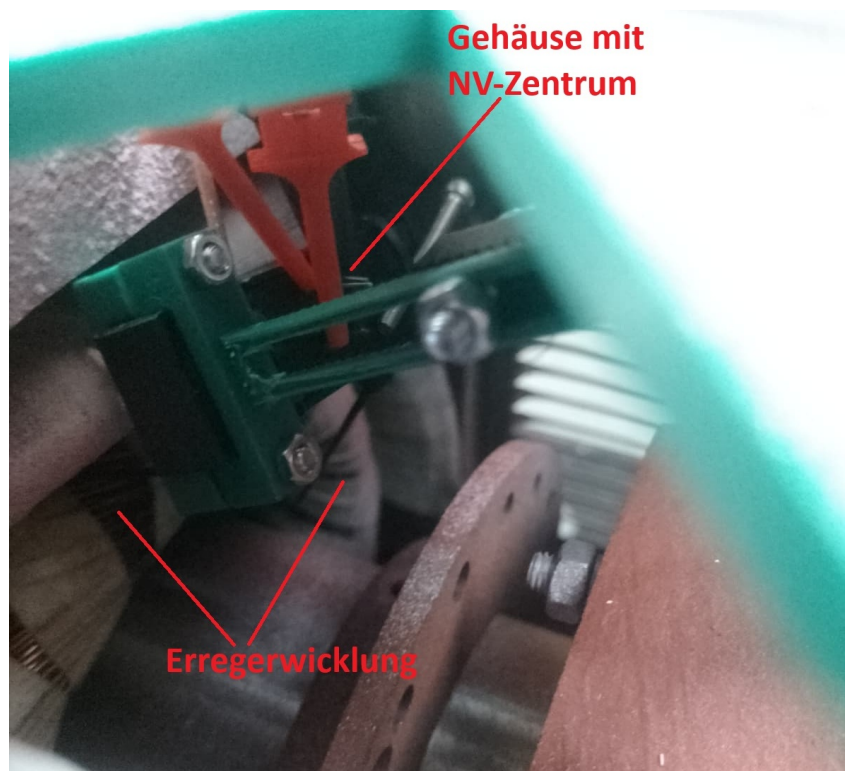


Abbildung 4.14: Kontaktherstellung am Resonator mithilfe eines gelöteten Drahtstücks

4.4.1 Exemplarische Versuchsdurchführung

Da das Prinzip der Spektrenauswertung in den kommenden Messreihen gleich bleibt, wird sie in diesem Abschnitt einmal ausführlich durchgegangen.

Dieses Spektrum wurde unter folgenden Bedingungen erstellt:

- NV-Zentrum wird parallel mit einem Abstand von wenigen Millimetern von der Erregerwicklung positioniert
- Der Strom durch die Erregerwicklung beträgt 0,65 A
- Zur Spektrumserstellung wurde der Mittelwertbildner verwendet. Dabei wurde den Variablen NUM_CYCLES = 1 und MEASUREMENTS_PER_VISIT = 10 zugewiesen
- Die Ankerwicklung wird nicht angeschlossen (kein Stromfluss durch den Anker und somit auch keine Drehbewegung des Motors)

Zuerst müssen die Resonanzeinbrüche in Abbildung 4.15 bestimmt werden. Diese befinden sich bei kleinen Strömen (im Bereich weniger Ampere) relativ nah an der Resonanzfrequenz und werden mit den roten Zahlen 1-4 dargestellt. Die gelben Einbrüche von a-c werden durch Rauschen erzeugt.

Im Anschluss können die einzelnen Einbrüche zu sogenannten Dip-Paaren zusammengefasst werden. Jedes Dip-Paar gibt an, wie stark das Magnetfeld einer Kristallachse ist: "Jedes Dip-Paar gibt eine Information darüber, wie stark das Magnetfeld entlang dieser Kristallachse ist." [2]. Hierbei bilden die beiden Einbrüche, die links und rechts von der Resonanzfrequenz der Nullfeldaufspaltung (2,87 GHz) am nächsten sind, ein Dip-Paar. Somit bilden 1-4 ein Paar und 2-3 ein weiteres Paar.

Nach der Bildung der Dip-Paare können die dazugehörigen Resonanzfrequenzen abgelesen werden. Hierfür ergibt sich Folgendes:

Einbruch 1 entspricht 2845 MHz

Einbruch 2 entspricht 2860 MHz

Einbruch 3 entspricht 2880 MHz

Einbruch 4 entspricht 2890 MHz

Nun kann daraus wiederum ω_0 mit der Gleichung 1.4 berechnet werden. (Zur Erinnerung, in der Fachliteratur bei NV-Zentren wird immer wieder die Kreisfrequenz ω gleich der normalen Frequenz f gesetzt.) Somit ergibt sich für das Dip-Paar 1-4 $\omega_{014} = 22,5$ MHz und für das Paar 2-3 $\omega_{023} = 10$ MHz.

$$\begin{aligned}\omega_{014} &= \frac{2890 \text{ MHz} - 2845 \text{ MHz}}{2} = 22,5 \text{ MHz} \\ \omega_{023} &= \frac{2880 \text{ MHz} - 2860 \text{ MHz}}{2} = 10 \text{ MHz}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Mithilfe des gyromagnetischen Verhältnisses $\gamma_e \approx 2,8 \frac{\text{MHz}}{\text{G}}$, einer physikalischen Konstanten, kann nun mit der Gleichung 1.5 die magnetische Flussdichte B berechnet werden. Hierfür ergibt sich für das Paar 1-4 die Flussdichte $B_{14} = 8,04$ G und für das Paar 2-3 $B_{23} = 3,57$ G.

$$\begin{aligned}B_{14} &= \frac{\omega_{014}}{\gamma_e} = \frac{22,5 \text{ MHz}}{2,8 \text{ MHz/G}} = 8,04 \text{ G} \\ B_{23} &= \frac{\omega_{023}}{\gamma_e} = \frac{10 \text{ MHz}}{2,8 \text{ MHz/G}} = 3,57 \text{ G}\end{aligned}\tag{4.2}$$

Daraus kann man schließen, dass das angelegte Magnetfeld 8,04 G stark sein muss, da alle Achsen das gleiche magnetische Feld aufnehmen. Der Unterschied lässt sich mit der räumlichen Ausrichtung (siehe Abbildung 1.1) der NV-Achsen zum Magnetfeld erklären.

Hinweis zur Fluoreszenzintensität

Die Fluoreszenzintensität ist bei gleichen Messparametern teilweise sehr unterschiedlich. Mögliche Änderungsgründe können beispielsweise eine Temperaturänderung oder eine minimale Positionsänderung (z.B. unabsichtliches Bewegen der Fotodiode um weniger als 1 mm durch Verrücken des Motors) sein.

Folglich kann diese Intensität nicht für sinnvolle direkte Vergleiche (trifft nicht auf die Position der Einbrüche zu) herangezogen werden. Beispielsweise macht es wenig Sinn, einen Helligkeitsfaktor aus zwei Messungen zu berechnen ($30000 \text{ a.u.} / 20000 \text{ a.u.} = 1,5$). Die zuverlässigste Konstante ist der Ort des Einbruchs und die damit einhergehende Frequenz.

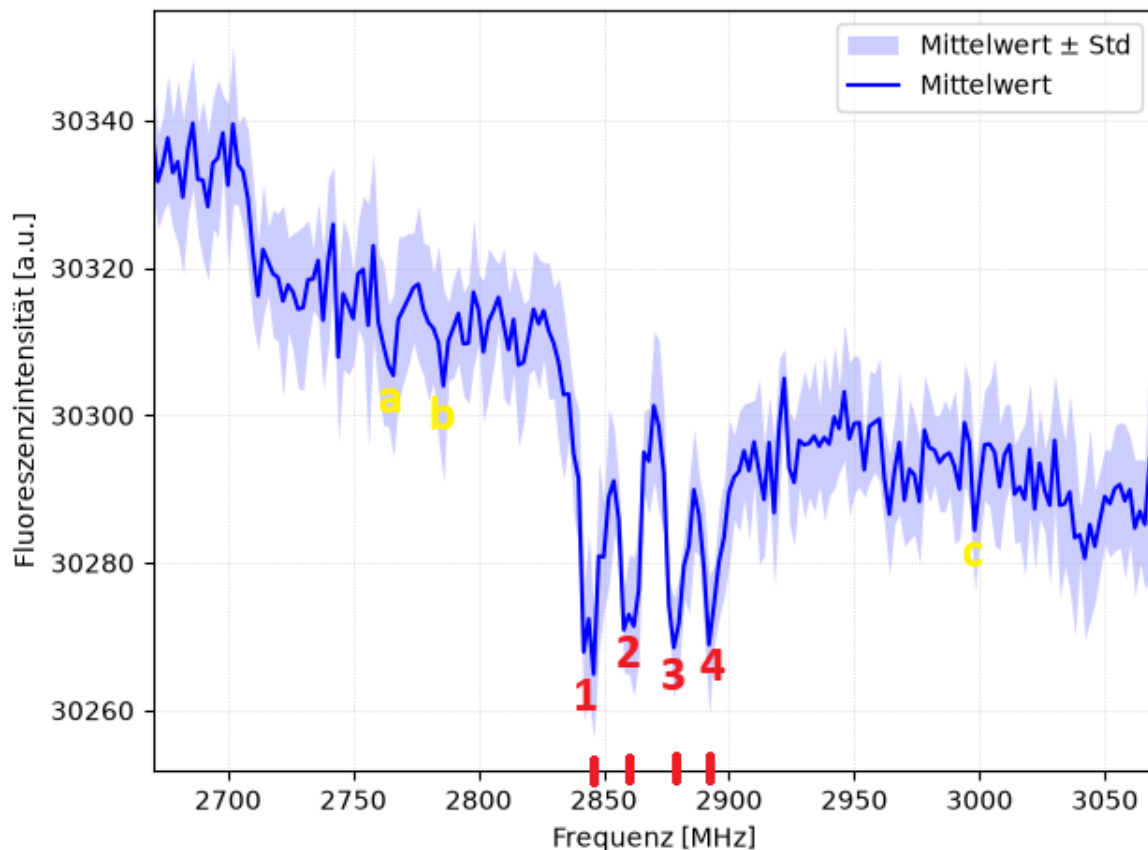


Abbildung 4.15: Fluoreszenzspektrum mit angelegtem Magnetfeld (Messparameter: 1 Zyklus, 10 Messwerte, 0,65 A durch Erregerwicklung)

4.4.2 1. Messreihe

Nachdem bekannt ist, wie ein Spektrum ausgewertet wird, kann mit der ersten Messreihe gestartet werden. Hierfür werden folgende Bedingungen verwendet:

- Die Messung wird mit 0,5 A, 1 A, 1,5 A und 2 A durch die Erregerwicklung durchgeführt
- NV-Zentrum wird parallel mit einem Abstand von wenigen Millimetern von der Erregerwicklung positioniert (siehe Abbildung 4.16)
- Zur Spektrumserstellung wurde der Mittelwertbildner verwendet. Dabei wurde den Variablen NUM_CYCLES = 1 und MEASUREMENTS_PER_VISIT = 10 zugewiesen
- Die Ankerwicklung wird nicht angeschlossen (kein Stromfluss durch den Anker und somit auch keine Drehbewegung des Motors)

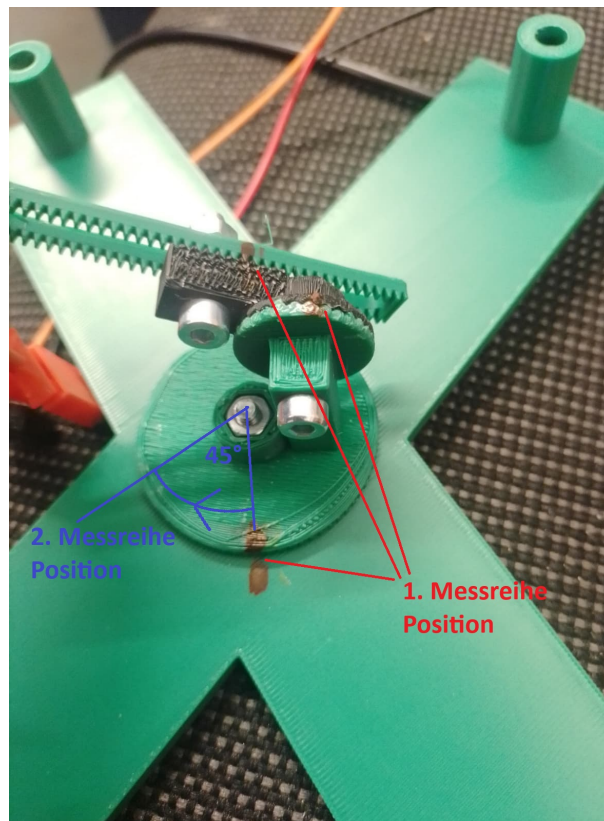


Abbildung 4.16: Positionierung der beiden Messreihen:

Auswertung der Fluoreszenzspektren

Nach der Messung ergeben sich zahlreiche Spektren. Einige finden sich in der Abbildung 4.17 wieder. Hierbei fällt eine massiv unterschiedliche Qualität auf. Während die Messung bei 0,5 A noch sehr leicht auszuwerten ist, fällt bei steigenden Strömen ein stetiger Abwärtstrend in der Fluoreszenz auf. Dies hat zur Folge, dass die Einbrüche in der Intensität (Dips) bei hohen Strömen kaum noch sichtbar sind. Deshalb lassen sich die Dips nur noch grob erahnen. Beispielsweise wäre es im unteren rechten Spektrum durchaus debattierbar, ob man mit der orangen Frequenz die Berechnungen durchführt, statt mit der rot markierten Frequenz. Wie sich jedoch später mit den beiden Tabellen

4.1 und 4.2 noch zeigen wird, ist die rote Frequenz als Resonanzfrequenz deutlich wahrscheinlicher, da die daraus berechnete Flussdichte dem linearen Zusammenhang des Zeeman-Effektes entspricht.

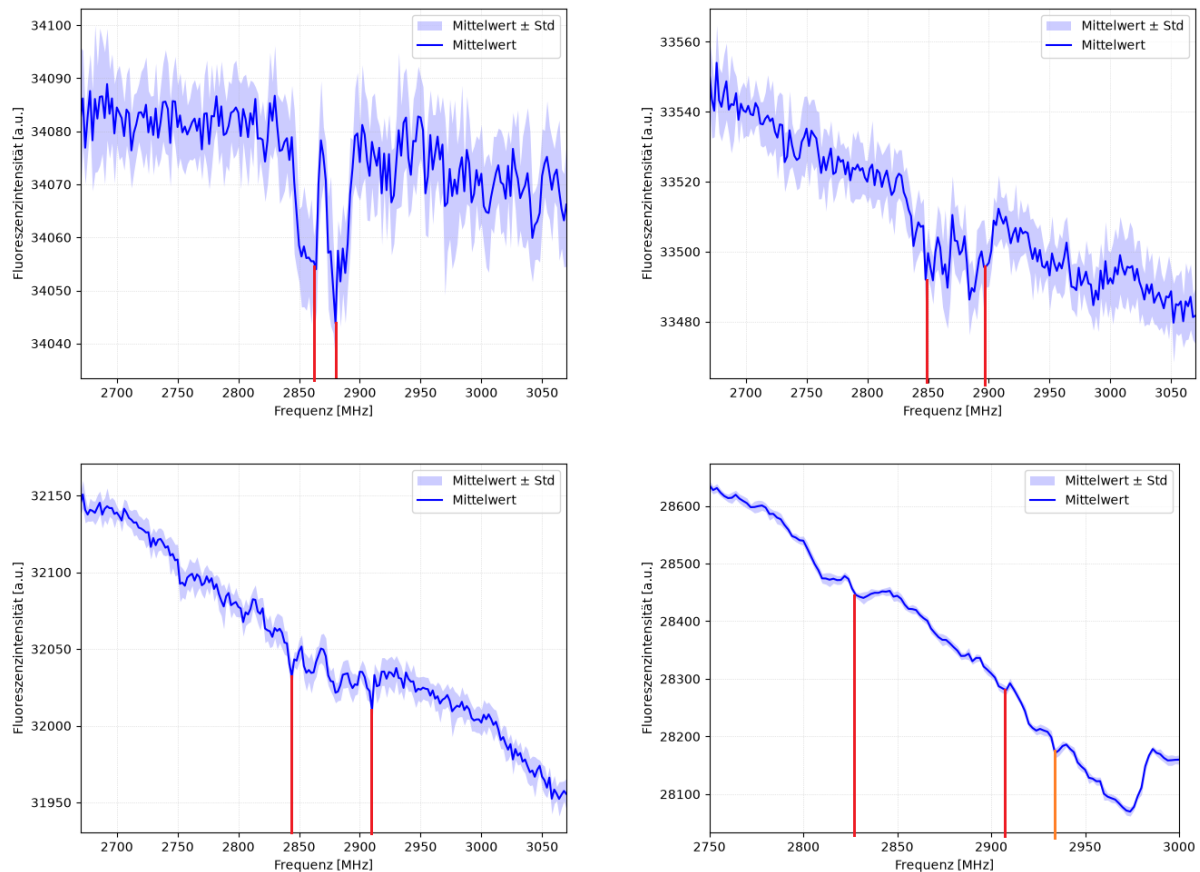


Abbildung 4.17: Fluoreszenzspektren mit unterschiedlichen Strömen in der Erregerwicklung (Messparameter: 1 Zyklus, 10 Messwerte)
 links oben: 0,5 A
 links unten: 1,5 A
 rechts oben: 1 A
 rechts unten: 2 A

Berechnung der magnetischen Flussdichte

Nach Auswertung aller Fluoreszenzspektren ergibt sich die Tabelle 4.1. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der Spektren, die in der Tabelle aufgenommen sind, von deren Qualität bestimmt wird.

Die erste Spalte gibt den Dateinamen des jeweiligen Spektrums an. Hier befindet sich am Anfang die Stromstärke, dann die dazugehörige Einheit und zuletzt welches Spektrum ausgewertet wird (aus einigen konnten keine Rückschlüsse gezogen werden). Beispielsweise bedeutet 2_A_4, dass in der Erregerwicklung ein Strom von 2 Ampere geflossen ist und dass es sich um das vierte Spektrum handelt.

Die Spalte Ableseprobleme gibt an, ob die Fluoreszenzdips bzw. Einbrüche ohne Probleme abgelesen werden konnten (n) oder ob diese nicht eindeutig sind (j). Zudem ist zu erwähnen, dass einige Spektren aufgrund der mangelnden Qualität völlig verworfen wurden (z.B. 2_A_2).

Der Strom gibt an, wie hoch der Strom durch die Erregerwicklung während der Messung war.

Die Spalten Dip 1 und Dip 2 geben die Position der Dips an, wobei nur die berücksichtigt werden, die am weitesten von der 2,87 GHz Resonanzfrequenz entfernt sind.

ω_0 gibt die berechnete Frequenz nach der Gleichung 1.4 an.

Die letzte Spalte B gibt die berechnete magnetische Flussdichte in Gauss mithilfe der Gleichung 1.5 an.

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass keine Spannungswerte in den Tabellen angegeben werden, da die Stromquelle der Erwärmung der Erregerwicklung mit einer Spannungserhöhung entgegenwirkt.

Tabelle 4.1: Bestimmung der magnetischen Flussdichte aus Messreihe 1

Dateiname	Ableseprobleme	Strom	Dip 1	Dip 2	ω_0	Flussdichte
0.5_A	n	0,5 A	2860 MHz	2880 MHz	10 MHz	3,57 G
1_A_1	j	1 A	2855 MHz	2895 MHz	20 MHz	7,14 G
1_A_2	n	1 A	2850 MHz	2895 MHz	22,5 MHz	8,04 G
1.5_A_1	j	1,5 A	2840 MHz	2910 MHz	35 MHz	12,50 G
1.5_A_2	j	1,5 A	2840 MHz	2910 MHz	35 MHz	12,50 G
1.5_A_3	n	1,5 A	2840 MHz	2910 MHz	35 MHz	12,50 G
2_A_1	j	2 A	2840 MHz	2920 MHz	40 MHz	14,29 G
2_A_4	j	2 A	2825 MHz	2910 MHz	42,5 MHz	15,18 G
2_A_6	j	2 A	2825 MHz	2915 MHz	45 MHz	16,07 G

In der Tabelle 4.1 finden sich zum Teil mehrere Messwerte, da das Ablesen mit steigender Stromstärke zunehmend schwieriger wird. Um einen zuverlässigeren Messwert zu erhalten, bietet es sich an, für jede Stromstärke eine durchschnittliche Flussdichte zu berechnen (siehe Tabelle 4.2).

Im Ganzen sollte sich ein linearer Zusammenhang ergeben. Grund hierfür ist, dass zum einen der Zeeman-Effekt einen linearen Verlauf (vergleiche Kapitel 1.6) aufweist, genauso wie das Verhältnis zwischen Strom und magnetischer Flussdichte. Dies bedeutet, dass eine Verdoppelung des Stroms auch eine Verdoppelung der Flussdichte und des Zeeman-Effekts zur Folge hat. Deshalb wird in der letzten Spalte in Tabelle 4.2 von einem linearen Zusammenhang ausgegangen, bei dem die berechnete durchschnittliche Flussdichte von 0,5 A hochgerechnet wird. (Beispiel: Bei 0,5 A ist die durchschnittliche Flussdichte 3,57 G, also sollte die durchschnittliche Flussdichte bei 1 A im Bereich von $2 \cdot 3,57 \text{ G} = 7,14 \text{ G}$ liegen)

Tabelle 4.2: Berechnung der durchschnittlichen Flussdichte um den linearen Zusammenhang zu Prüfen

Stromstärke	Durchschnittliche Flussdichte	Linearer Zusammenhang
0,5 A	3,57 G	3,57 G
1 A	7,59 G	7,14 G
1,5 A	12,50 G	10,71 G
2 A	15,18 G	14,29 G

Schlussfolgerung

Beim Betrachten der Tabelle 4.1 fällt auf, dass die Zahl der zur Auswertung benötigten Spektren bei höheren Strömen deutlich steigt. Beispielsweise wurden bei zwei Ampere Erregerstrom sechs Spektren benötigt (bei denen 3 komplett verworfen wurden), um eine Auswertung zu ermöglichen. Dies lässt sich mit dem Trend der immer schneller fallenden Fluoreszenzintensität bei steigenden Strömen in Abbildung 4.17 erklären. Wobei nicht genau klar ist, weshalb dieser Trend zu Tage tritt. Eine Möglichkeit wäre die Erwärmung der Erregerwicklung durch immer höher werdende Ströme, was wiederum eine Erwärmung des NV-Zentrums zur Folge hat. Eine andere Möglichkeit ist beispielsweise, dass das NV-Zentrum irgendwann aufgrund des stärker werdenden Magnetfelds gesättigt wird.

Bei Betrachtung der beiden Dips (siehe Tabelle 4.1) fällt auf, dass sich die Resonanzpunkte bei steigenden Strömen immer weiter voneinander entfernen. Dies spiegelt den linearen Zusammenhang des Zeeman-Effekts in Kapitel 1.6 wieder.

Dieser Zusammenhang wird von der Tabelle 4.2 gestützt. Vergleicht man die berechnete durchschnittliche Flussdichte mit der zu erwartenden Flussdichte in der Spalte "Linearer Zusammenhang", so befinden sich beide Werte in der selben Größenordnung. Der Unterschied von 1-2 G kann durch fehlende Ablesegenauigkeit (vor allem bei den höheren Strömen) erklärt werden.

4.5 2. Messreihe

Nach der ersten Messreihe wird eine zweite Messreihe von einer anderen Position des NV-Zentrums aufgenommen. Hierfür werden folgende Bedingungen verwendet:

- Die Messung wird mit 2 A, 1,5 A, 1 A und 0,5 A durchgeführt (umgekehrte Messreihenfolge)
- NV-Zentrum wird in einem 45° Winkel zur Erregerwicklung positioniert (siehe Abbildung 4.16). Dies hat auch zur Folge, dass das NV-Zentrum aufgrund des Platzmangels einen ungefähren Abstand von 2 cm zur Wicklung hat.
- Zur Spektrumserstellung wurde der Mittelwertbildner verwendet. Dabei wurde den Variablen NUM_CYCLES = 1 und MEASUREMENTS_PER_VISIT = 5 zugewiesen

- Die Ankerwicklung wird nicht angeschlossen (kein Stromfluss durch den Anker und somit auch keine Drehbewegung des Motors)

Die Messreihenfolge wurde verändert, damit die Erregerwicklung eine geringere Temperatur bei den hohen Strömen aufweist, um den Einfluss der Erwärmung zu reduzieren. Zusätzlich wird die MEASUREMENTS_PER_VISIT von 10 auf 5 reduziert, um die Messdauer zu verkürzen. Beide Maßnahmen sollen die Messung von hohen Strömen verbessern.

Auswertung der Fluoreszenzspektren

Nach der Messung ergeben sich zahlreiche Spektren. Einige finden sich in der Abbildung 4.18 wieder. Die Qualität dieser Spektren hat sich im Vergleich zur ersten Messreihe verbessert. Der Hauptgrund ist vermutlich die Verringerung der Anzahl der Messwerte von 10 auf 5 und einer damit einhergehenden Reduzierung der Messzeit um ca. die Hälfte (jetzige Messdauer ca. 2 Minuten). Allerdings führt diese zu einem höheren Rauschen, da dem Mittelwertbildner weniger Messwerte zur Verfügung stehen. Hierdurch entsteht die Gefahr, dass ein zufälliges Rauschen als ein Dip interpretiert wird.

Die Änderung der Messreihenfolge (Beginn bei 2 A) zeigt auch eine Verbesserung, da der Abwärtstrend nur noch im rechten unteren Spektrum sichtbar ist. Dieser Abwärtstrend wird jedoch teilweise mit einem Aufwärtstrend (linkes unteres Spektrum) ersetzt, welcher eine deutlich geringere Steigung aufweist, wodurch die Fluoreszenzeinbrüche sichtbarer bleiben.

Berechnung der magnetischen Flussdichte

Nach Auswertung aller Fluoreszenzspektren ergeben sich die Tabellen 4.3 und 4.4. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der Spektren, die in der Tabelle aufgenommen sind, von deren Qualität bestimmt wird.

Tabelle 4.3: Bestimmung der magnetischen Flussdichte aus Messreihe 2

Dateiname	Ableseprobleme	Strom	Dip 1	Dip 2	ω_0	Flussdichte
0.5_A_1	n	0,5 A	2860 MHz	2875 MHz	7,5 MHz	2,68 G
0.5_A_2	n	0,5 A	2860 MHz	2875 MHz	7,5 MHz	2,68 G
1_A_1	n	1 A	2860 MHz	2880 MHz	10 MHz	3,57 G
1_A_2	n	1 A	2850 MHz	2880 MHz	15 MHz	5,36 G
1.5_A_1	n	1,5 A	2840 MHz	2890 MHz	25 MHz	8,93 G
1.5_A_2	j	1,5 A	2855 MHz	2905 MHz	25 MHz	8,93 G
1.5_A_3	n	1,5 A	2850 MHz	2895 MHz	22,5 MHz	8,04 G
1.5_A_4	j	1,5 A	2845 MHz	2895 MHz	25 MHz	8,93 G
2_A_1	j	2 A	2840 MHz	2900 MHz	30 MHz	10,71 G
2_A_2	j	2 A	2855 MHz	2905 MHz	25 MHz	8,93 G
2_A_4	j	2 A	2825 MHz	2925 MHz	50 MHz	17,86 G
2_A_5	j	2 A	2835 MHz	2930 MHz	47,5 MHz	16,96 G
2_A_6	n	2 A	2840 MHz	2900 MHz	30 MHz	10,71 G

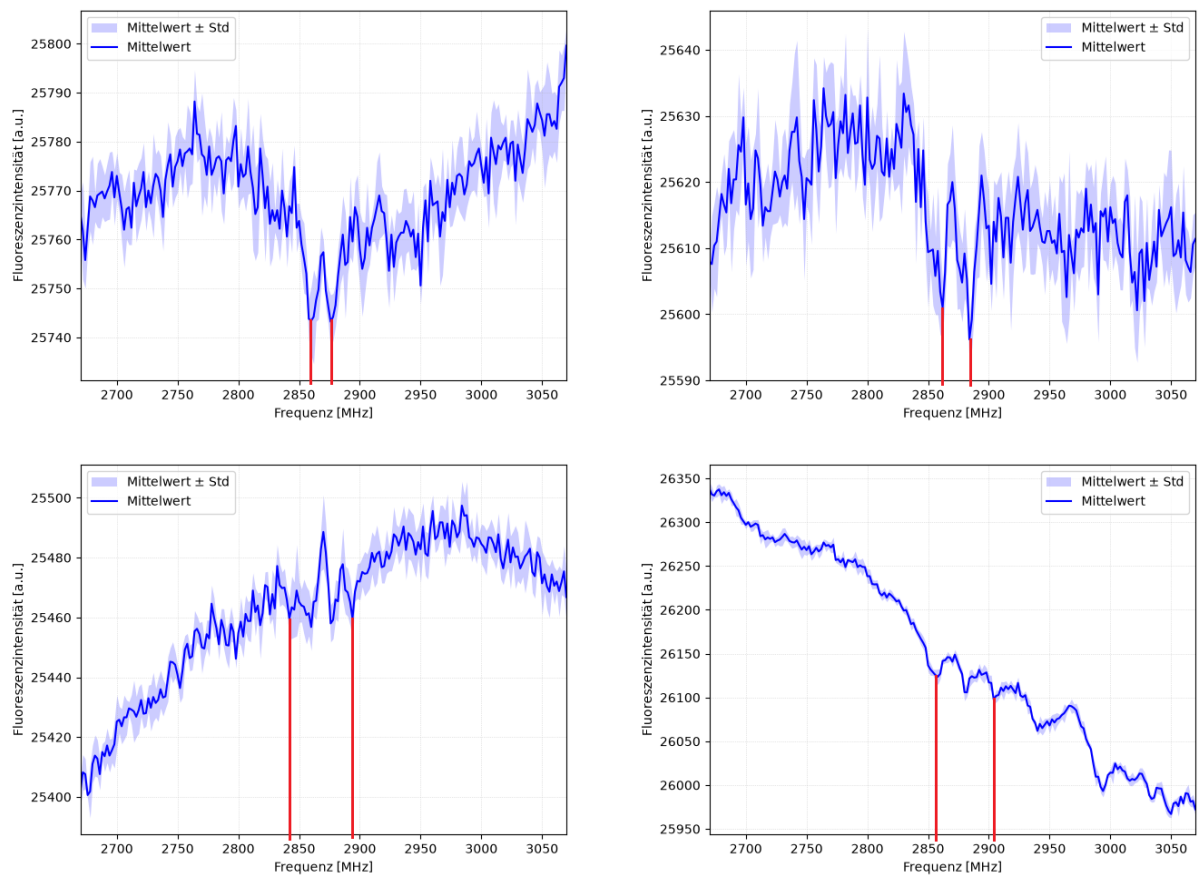


Abbildung 4.18: Fluoreszenzspektren mit unterschiedlichen Strömen in der Erregerwicklung (Messparameter: 1 Zyklus, 5 Messwerte)
links oben: 0,5 A
rechts oben: 1 A
links unten: 1,5 A
rechts unten: 2 A

Tabelle 4.4: Berechnung der durchschnittlichen Flussdichte um den linearen Zusammenhang zu Prüfen

*Durchschnittliche Flussdichte ohne die Messungen 2_A_4 und 2_A_5

Stromstärke	Durchschnittliche Flussdichte	Linearer Zusammenhang
0,5 A	2,68 G	2,68 G
1 A	4,46 G	5,36 G
1,5 A	8,71 G	8,04 G
2 A	13,04 G	10,71 G
2 A*	10,12 G	10,71 G

Schlussfolgerung

Beim Betrachten der Tabelle 4.3 fällt auf, dass auch hier bei höheren Strömen mehrerer Spektren zur Auswertung benötigt werden. Es hat sich jedoch die Zahl der Ableseprobleme verringert, was dafür spricht, dass die ergriffenen Maßnahmen (Beginn der Messung bei 2 A und eine Reduzierung der Messpunkte von 10 auf 5) eine Verbesserung zur Folge haben. Ob diese Verbesserung auf eine weniger starke Erwärmung des NV-Zentrums zurückzuführen ist, bleibt bislang noch unbekannt, auch wenn es zumindest ein Hinweis darauf ist.

Auch in dieser Messreihe steigt der Abstand ω_0 zwischen beiden Dips näherungsweise linear. Hier stechen jedoch die Messungen 2_A_4 und 2_A_5 hervor, die mit $\omega_0 = 50$ MHz und $\omega_0 = 47,5$ MHz den linearen Zusammenhang scheinbar brechen. Da beide Messungen Ableseprobleme aufweisen, ist es deutlich wahrscheinlicher, dass der Intensitätseinbruch missinterpretiert wurde und der Dip nicht ersichtlich ist (siehe Abbildung 4.19).

Abschließend ist noch auf die Dauer eines Messdurchlaufs einzugehen. Da eine Messung mehrere Minuten dauert, ist das Messen eines dynamischen Magnetfelds ohne weitere Anpassungen nicht machbar. Mit der aktuellen Konfiguration ist nur die Messung eines konstanten Magnetfelds sinnvoll.

Auch in der Tabelle 4.4 wird deutlich, dass die durchschnittliche Flussdichte sehr nahe am linearen Zusammenhang (durchschnittliche Flussdichte von 0,5 A hochgerechnet) liegt. Werden die beiden falschen Messungen 2_A_4 und 2_A_5 ignoriert, liegt die maximale Abweichung unter 1 G. Damit ist auch hier der zu erwartende lineare Zusammenhang gegeben.

Vergleicht man beide Messreihen miteinander, so fällt auf, dass fast alle (Eine Ausnahme sind z.B. die bereits erwähnten Messungen 2_A_4 und 2_A_5) magnetischen Flussdichten bei der Messreihe 2 kleiner sind als bei Messreihe 1. Dies lässt sich mit der Erhöhung des Abstands von wenigen Millimetern auf zwei Zentimeter zwischen NV-Zentrum und Erregerwicklung erklären, da die magnetische Flussdichte mit steigendem Abstand abnehmen sollte.

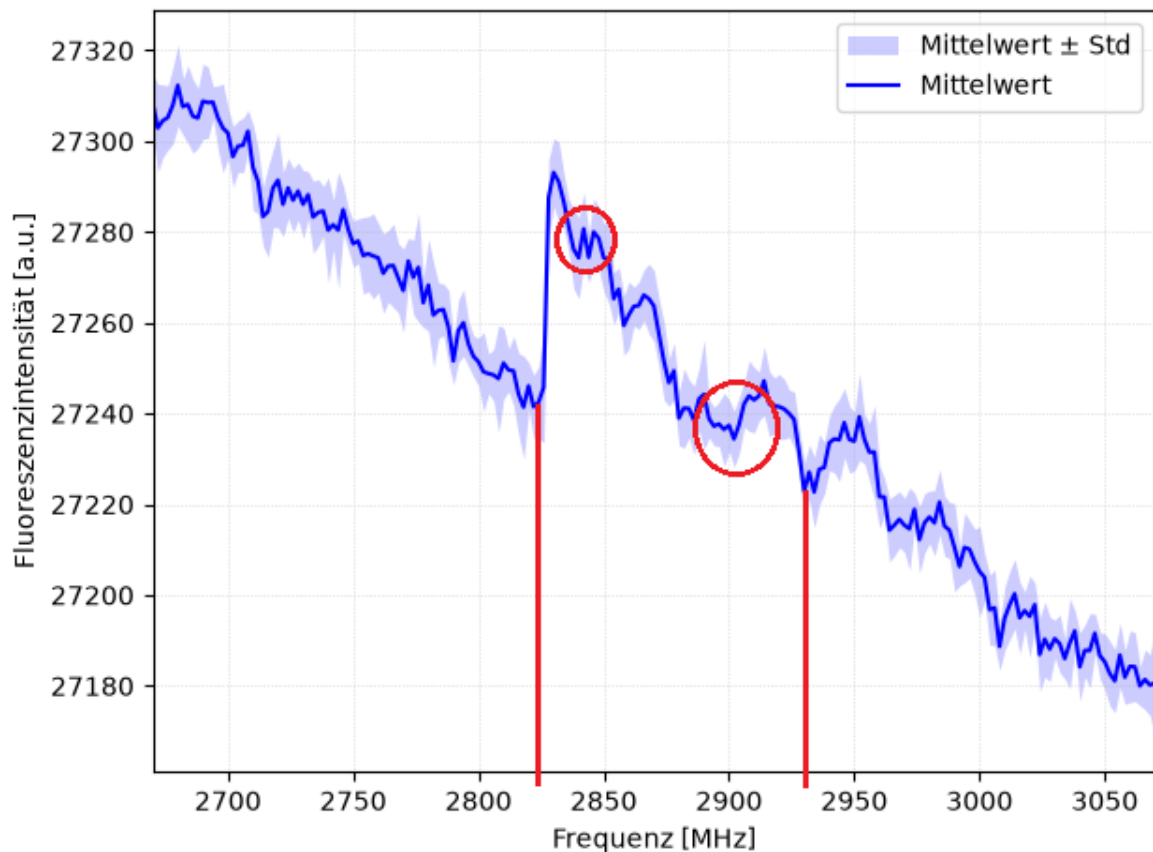


Abbildung 4.19: Messung 2_A_4: Durch ein Spektrum mit geringer Qualität, kann es sehr leicht zu Missinterpretationen kommen. Hier wurden die Frequenzen 2825 MHz und 2925 MHz als Dips interpretiert. Wird es mit den anderen Messungen verglichen, fällt auf, dass es den linearen Zusammenhang des Zeeman-Effekts bricht. Aus den anderen Messungen bei 2 A ist bekannt, dass Dips bei 2840 MHz und 2900 MHz auftauchen. Bei genauerer Betrachtung sind dort auch in diesem Spektrum kleine Einbrüche (rote Kreise) zu erkennen.

4.6 Abschlussergebnisse und Fazit

Nachdem alle Meilensteine durchgeführt und ausgewertet wurden, befasst sich dieses Kapitel mit einem abschließenden Ergebnis zu allen Versuchen und einem Ausblick, welche Anpassungen und Messungen in Zukunft noch durchgeführt werden können.

Quenching

Der erste Meilenstein behandelt das Quenching, das auch als Fluoreszenzlöschung bekannt ist. Dabei wurde sich mit einem Magneten dem NV-Zentrum angenähert, wodurch sich die Menge an emittierten rotem Licht reduziert hat. Diese Reduzierung konnte mittels einer Fotodiode erkannt und angezeigt werden. Dieser Versuch ist allerdings durch die hohen Abweichungen, eher als "Proof of Concept" zu betrachten. Deshalb würde er sich beispielsweise auch nicht als Näherungssensor eignen.

In Zukunft kann dieser Versuch mit einem Python-Programm erweitert werden, das ähnlich wie die Programme vom ODMR Versuch funktioniert. Nur mit dem Unterschied, dass diesmal keine Frequenz erzeugt wird und die Frequenz (auf der x-Achse) durch eine Zeitmessung ersetzt wird. Mit dieser Anpassung wäre auch eine Verwendung als Näherungssensor denkbar.

ODMR

Der zweite Meilenstein behandelte die Messung der Nullfeldaufspaltung mithilfe von ODMR. Hierbei wurde das NV-Zentrum mit unterschiedlichen Mikrowellen (Bereich von 2670 MHz bis 3070 MHz) bestrahlt, um ein Fluoreszenzspektrum zu erhalten. Im Spektrum zeigt sich bei 2870 MHz ein Einbruch bzw. Dip in der Fluoreszenzintensität. Da bei der Nullfeldaufspaltung, also kein anliegendes Magnetfeld, genau dieser Einbruch zu erwarten ist, kann die Messung als voller Erfolg gewertet werden.

Künftig müssen für diesen Versuch keine weiteren Anpassungen erfolgen. Eine Optimierung der Messdauer wäre allerdings von Vorteil. Zusätzlich wäre eine genaue Fehlersuche bei der senseBox möglich, da der Mikrowellengenerator nicht wie vorgesehen von der senseBox angesteuert wurde sondern über den FT232H Adapter.

Magnetfeldmessung an einem Gleichstrommotor

Im letzten Meilenstein wurde mithilfe der ODMR-Methode ein Magnetfeld eines Gleichstrommotors untersucht. Hierfür wurde nur in die Erregerwicklung (die Ankerwicklung wurde nicht angeschlossen und somit dreht sich der Motor nicht) mittels einer Gleichstromquelle ein vorher definierter Strom eingeprägt. Dadurch baute sich ein Magnetfeld auf, das im NV-Zentrum den sogenannten Zeeman-Effekt hervorruft (Aufspaltung und Verschiebung der Resonanzfrequenzen). Durch Bestrahlen mit Mikrowellen werden diese Resonanzfrequenzen in einem Fluoreszenzspektrum in Form von Dips sichtbar. Dadurch sind wiederum Rückschlüsse über die magnetische Flussdichte möglich. In der Auswertung wurde deutlich, dass der zu erwartende lineare Zusammenhang (z.B. doppelte Stromstärke hat doppelte Flussdichte zur Folge) in beiden Messreihen erfüllt wurde. Hierbei erwies sich allerdings die Auswertung bei hohen Strömen als schwierig. Grund hierfür war zum einen das Rauschen oder ein fallender Trend in der Fluoreszenzintensität, wobei der genaue Grund für letzteres

jedoch weiter unbekannt bleibt. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise eine Erwärmung des NV-Zentrums durch den Stromfluss in der Erregerwicklung. Ein weiteres Problem sind die langen Messzeiten, weshalb dieses NV-Zentrum noch nicht als Ersatz für Hallsensoren geeignet ist.

In weiterführenden Versuchen wäre eine Untersuchung der Temperaturabhängigkeit eines NV-Zentrums mittels eines Temperatursensors (z.B. PT100) von Interesse. Dadurch könnte der fallende Trend in der Fluoreszenzintensität besser beurteilt werden. Zusätzlich wäre eine tiefer gehende Recherche möglich, um andere Effekte zu identifizieren (z.B. ob ein NV-Zentrum von einem Magnetfeld gesättigt werden kann).

Eine weitere, künftig Sinnvolle Anpassung ist die in ODMR erwähnte Verkürzung der Messzeit. Dadurch würde der Abwärtstrend zum einen nicht mehr so massiv ins Gewicht fallen und zum anderen könnte das Rauschen weiter verringert werden, da in der gleichen Zeit mehr Messwerte zur Verfügung stehen würden.

Eine Erweiterung um ein weiteres Messverfahren ist für künftige Messungen auch von Interesse. So könnte beispielsweise mit gepulster ODMR auch ein dynamisches Magnetfeld vermessen werden.

Literatur

- [1] Mario Bähr. "Skalierfähige Komponenten für Magnetometrie basierend auf NV-Zentren in Diamant". Diss. Universität Leipzig, 2024. URL: <https://d-nb.info/137124040X/34>.
- [2] Andre Bülau. *Persönliche Kommunikation*. E-Mail. Sep. 2026.
- [3] Philips Semiconductors. *BC547: NPN General Purpose Transistors*. Datasheet. Philips Semiconductors. 2004. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/16101/PHILIPS/BC547.html>.
- [4] *Quanten Interaktiv*. Website. URL: <https://qoool-sensing.org/de/world-of-quantum> (besucht am 29.08.2026).
- [5] *Quanten Interaktiv*. Website. URL: <https://qoool-sensing.org/de/quantum-interactive/diy/quenching/> (besucht am 05.09.2026).
- [6] *Quanten Interaktiv*. Website. URL: <https://qoool-sensing.org/de/quantum-interactive/diy/odmr/> (besucht am 07.09.2026).
- [7] Simon Schmitt. "Genauer dank altem Trick". In: *Physik in unserer Zeit* 49.5 (2018), S. 246–253. DOI: <https://doi.org/10.1002/piuz.201801510>.
- [8] senseBox. *Software-Installation*. 2024. URL: <https://sensebox.github.io/books-v2/home/de/erste-schritte/software-installation.html> (besucht am 30.07.2026).
- [9] Oliver Tennert. *Quantenmechanik I: Von den Axiomen zu einfachen Modellen*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2024. ISBN: 978-3-662-68584-6. DOI: 10.1007/978-3-662-68585-3.
- [10] Rheinland-Pfälzische Technische Universität. *Was ist Spin?* URL: <https://rptu.de/trr173/sfb-spin-x/was-ist-spin-x/was-ist-spin> (besucht am 04.09.2026).
- [11] Johannes Verst. "Aufbau eines Messplatzes zur optischen Detektion magnetischer Resonanz und Manipulation von NV-Zentren". Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 16. Sep. 2014. URL: <https://www.quantenbit.physik.uni-mainz.de/files/2018/05/Diplomarbeit-Johannes-Verst.pdf>.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Modellaufbau eines NV-Zentrums: V = Fehlstelle (gestrichelter Kreis), N = Stickstoffatom (gelb), C = Kohlenstoffatom (grau und schwarz), unterschiedliche Achsen (blau) [1]	2
1.2	a) Vereinfachte Darstellung der Energieniveaus [7]. b) Grüner Pfeil: Anregung durch einen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm. Roter Pfeil (637 nm): direkter Übergang unter Emission von rotem Licht mit einer Wellenlänge von 637 nm. Roter Pfeil (1039 nm): indirekter Übergang unter Emission von nicht sichtbarem Licht [1].	3
1.3	Kennlinien zur Reduzierung der Fluoreszenz mithilfe eines Magnetfeldes [4]	4
1.4	Fluoreszenzspektrum ohne externes Magnetfeld und einer Resonanzfrequenz bei 2,87 GHz [11].	6
1.5	Fluoreszenzspektrum mit externem Magnetfeld und Aufspaltung durch den Zeeman-Effekt [11].	7
1.6	Vereinfachte Darstellung des Zeeman-Effekts [4].	8
1.7	Linearer Zusammenhang zwischen der Flussdichte und dem Abstand zwischen beiden Resonanzfrequenzen [11].	9
2.1	Schaltplan zum Quenchingversuch [5].	11
2.2	Richtige Positionierung der Fotodiode und des NV-Zentrums. Um die Bauteile besser identifizieren zu können, wurde der Abstand zwischen Fotodiode und NV-Zentrum vergrößert	13
2.3	Kathode und Anode der Fotodiode [5].	13
2.4	1. Zeile: AINVAL (Summe mehrerer Spannungsmessungen) 2. Zeile links: alpha (Gewichtung von filtOut) 2. Zeile rechts: PWMVAL255 (Einstellbare Helligkeit der LED) 3. Zeile: filtOut (Helligkeitsänderung) [5].	15
2.5	Blocklyprogramm-Codeausschnitte	18
2.6	Quenching: filtOut(untere Zeile Display) ist bei 0 eingependelt und grüne Anzeige-LED ist aus. Nächste Messung kann durchgeführt werden	19
2.7	Magnetfeld hat sich beim NV-Zentrum geändert, weshalb es zum Quenching-Effekt kommt. Dies ist erkennbar, da filtOut (untere Zeile Display) -182 anzeigt. Somit leuchtet auch die grüne Anzeige-LED minimal	21
3.1	a) Mikrowellengenerator ADF4351 b) Adapter FT232H	25

3.2	Schaltplan von Qoool [6], der mit der senseBox funktionieren sollte . . .	26
3.3	Angepasster Schaltung, der für die Verwendung eines FT232H Adapters ausgelegt ist [6]	27
3.4	Einfache Möglichkeit zur Bestimmung des Boards und des dazugehörigen COM-Anschlusses.	28
3.5	Ordnerbezeichnung muss mit "Grundprogramm" hinterlegt sein, da Arduino IDE die .ino-Datei sonst nicht öffnen kann	29
3.6	Virtuelle Umgebung in Python erstellen	29
3.7	Pakete manuell installieren. 1. Eingabe des Befehls "pip install pyserial" 2. automatische Ausführung nach dem Befehl	30
3.8	Codeausschnitt aus dem Pythoncode für die einfache Messung. Für diese Einstellung ergibt sich nach der Gleichung 3.2 eine Schrittbreite von 2MHz	32
3.9	Codeausschnitt aus dem Pythoncode zum Mittelwertbildner	32
3.10	Nullfeldaufspaltung (rote Box): Erkennbar an den charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität im Bereich von 2,87 GHz	35
3.11	Nullfeldaufspaltung (rote Box): Erkennbar an den charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität im Bereich von 2,87 GHz	35
3.12	Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildung (Messparamter: 1 Zyklus, 5 Messwerte)	36
3.13	Nullfeldaufspaltung mit Mittelwertbildung (Messparamter: 2 Zyklus, 5 Messwerte)	37
4.1	DC-Motor mit möglichen Messstellen	39
4.2	a)Skizze des Gehäusedeckels (Draufsicht) b) Skizze der Messstelle (Draufsicht)	40
4.3	CAD-Zeichnung vom Hirth-Kreuz	40
4.4	CAD-Zeichnung von Bauteil 2: a) Isometrische Ansicht b) Ansicht von unten	41
4.5	CAD-Zeichnung von Bauteil 3	42
4.6	CAD-Zeichnung von Bauteil 3 mit Fokus auf die Zähne	42
4.7	CAD-Zeichnung von Bauteil 4 mit Rastverzahnung mit Gabel (orange) und dazugehörigen Gegenstück der Gabel (grün)	42
4.8	Halterung nach Schritt 1	44
4.9	Halterung nach Schritt 2	45
4.10	Halterung nach Schritt 3	46
4.11	Halterung nach Schritt 4	46
4.12	Halterung nach Schritt 5: Vollständig montierte Baugruppe von außen .	47
4.13	Halterung nach Schritt 5: Positionierung des NV-Zentrums neben der Erregerwicklung	48
4.14	Kontaktherstellung am Resonator mithilfe eines gelöteten Drahtstücks .	49
4.15	Fluoreszenzspektrum mit angelegtem Magnetfeld (Messparamter: 1 Zyklus, 10 Messwerte, 0,65 A durch Erregerwicklung)	51
4.16	Positionierung der beiden Messreihen:	52

- 4.17 Fluoreszenzspektren mit unterschiedlichen Strömen in der Erregerwicklung (Messparameter: 1 Zyklus, 10 Messwerte) links oben: 0,5 A
rechts oben: 1 A links unten: 1,5 A rechts unten: 2 A . . . 53
- 4.18 Fluoreszenzspektren mit unterschiedlichen Strömen in der Erregerwicklung (Messparameter: 1 Zyklus, 5 Messwerte) links oben: 0,5 A
rechts oben: 1 A links unten: 1,5 A rechts unten: 2 A . . . 57
- 4.19 Messung 2_A_4: Durch ein Spektrum mit geringer Qualität, kann es sehr leicht zu Missinterpretationen kommen. Hier wurden die Frequenzen 2825 MHz und 2925 MHz als Dips interpretiert. Wird es mit den anderen Messungen verglichen, fällt auf, dass es den linearen Zusammenhang des Zeeman-Effekts bricht. Aus den anderen Messungen bei 2 A ist bekannt, dass Dips bei 2840 MHz und 2900 MHz auftauchen. Bei genauerer Betrachtung sind dort auch in diesem Spektrum kleine Einbrüche (rote Kreise) zu erkennen. 59

Tabellenverzeichnis

4.1	Bestimmung der magnetischen Flussdichte aus Messreihe 1	54
4.2	Berechnung der durchschnittlichen Flussdichte um den linearen Zusammenhang zu Prüfen	55
4.3	Bestimmung der magnetischen Flussdichte aus Messreihe 2	56
4.4	Berechnung der durchschnittlichen Flussdichte um den linearen Zusammenhang zu Prüfen *Durchschnittliche Flussdichte ohne die Messungen 2_A_4 und 2_A_5	58