

Aufbau und Test eines konfokalen Mikroskops für Untersuchungen von Farbzentren bei mK-Temperaturen

von

Alexander Stahl

Masterarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 04. Januar 2018

1. Gutachter: Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler
2. Gutachter: Prof. Dr. Dmitry Budker

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 04.01.2018

Alexander Stahl
QUANTUM
Institut für Physik
Staudingerweg 7
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz
alstahl@students.uni-mainz.de

Zusammenfassung

Farbzentren in Diamanten sind optisch adressierbare Qubits, die sich mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand ansteuern lassen. Insbesondere Silizium-Farbzentren zeigen bei kryogenen Temperaturen interessante Eigenschaften. Sie stellen damit vielversprechende Kandidaten für die Schnittstelle zwischen stationären und beweglichen Qubits in Anwendungen wie z. B. dem Quantenschlüsselaustausch dar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines konfokalen Mikroskops zur Charakterisierung der Eigenschaften von Silizium-Farbzentren bei Temperaturen im Bereich von Millikelvin und den ersten Messungen, die damit möglich waren.

Das konfokale Mikroskop selbst wurde an der Universität Ulm entwickelt und an der Universität Mainz an einem Kryostaten angebracht. Dazu wurde ein Laser und eine Möglichkeit zur Detektion der Fluoreszenz aufgebaut.

Im ersten Teil des Experiments wurde die Fluoreszenz von Nanodiamanten mit Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) aufgenommen. Diese Nanodiamanten wurden dann auf 12 K gekühlt. Während des Kühlvorgangs wurde das Fluoreszenzspektrum der NV-Zentren vermessen. Somit gelang es, die Halbwertsbreite (FWHM) der Punktverteilungsfunktion (PSF) des Mikroskops zu $1.88 \mu\text{m}$ in x- und $1.38 \mu\text{m}$ in y-Richtung zu bestimmen. Außerdem konnte ein Anstieg der relativen Intensität des Null-Phononen-Übergangs (ZPL) von ca. 0.5% auf ca. 3% beobachtet werden.

In einer zweiten Messreihe wurden Silizium-Fehlstellen-Zentren (SiV-Zentren) auf ca. 100 K gekühlt und währenddessen ihre gemessene Position verfolgt. So konnte festgestellt werden, dass sich das Mikroskop während des Kühlens um ca. $160 \mu\text{m}$ in x- und y-Richtung und ca. $60 \mu\text{m}$ in z-Richtung verzieht. Es wurde außerdem gezeigt, dass das Mikroskop in der Lage ist, einzelne Farbzentren aufzulösen.

Darüber hinaus konnten praktische Hinweise zur Justage des konfokalen Mikroskops, zur Bedienung des Kryostaten und zur Herstellung von Kabelsträngen zur Verwendung im Kryostaten zusammengetragen werden.

Abstract

Color centers in diamond are optically addressable qubits. The technical requirements to detect and manipulate them are comparably low. I.e. silicon vacancy centers show interesting properties at cryogenic temperatures, making them promising candidates for the missing link between stationary and flying qubits in technologies like quantum key distribution.

This thesis describes the experimental setup using a confocal microscope intended to characterize silicon vacancy centers at millikelvin temperatures and first measurements with this setup.

The confocal microscope has been designed at the University of Ulm and was attached to a cryostat at the University of Mainz. In addition a laser setup and a fluorescence detection setup has been built.

In the first part of the experiment, the fluorescence of nanodiamonds containing nitrogen vacancy centers (NV-centers) was detected. Then the fluorescence spectra at temperatures down to 12 K have been taken. With this technique we were able to measure the full width at half maximum (FWHM) of the point spread function (PSF) of the microscope. It is $1.88\ \mu\text{m}$ in x- and $1.38\ \mu\text{m}$ in y-direction. In addition an increase in the relative intensity of the zero phonon line (ZPL) from about 0.5% to about 3% could be detected.

In a second experiment, silicon vacancy centers (SiV-centers) have been cooled to 100 K and their position has been measured, to characterize drifts in the microscope. We conclude, that the microscope drifts about $160\ \mu\text{m}$ in x- and y-direction and about $60\ \mu\text{m}$ in z-direction. It has also been shown, that the microscope is able to resolve single vacancy centers.

For further experiments, practical hints how to align the microscope, how to handle the cryostat and how to craft cryolooms were gathered.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	v
1. Einleitung	1
2. Eigenschaften von Farbzentren und konfokalen Mikroskopen	3
2.1. Stickstoff-Farbzentren (NV) in Diamant	3
2.2. Silizium-Farbzentren (SiV) in Diamant	4
2.3. konfokale Mikroskopie	5
3. Aufbau des Experiments	7
3.1. Optomechanischer Aufbau	7
3.1.1. Laseraufbau	7
3.1.2. Konfokales Mikroskop	10
3.1.3. Detektionsaufbau	11
3.2. Kryostat	12
4. Messungen und Ergebnisse	15
4.1. Verwendete Proben	15
4.2. Stickstoff-Farbzentren (NV)	16
4.2.1. orts aufgelöste Fluoreszenzmessungen	16
4.2.2. Temperaturabhängige Spektren.	18
4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)	21
4.3.1. Messung der temperaturabhängigen Drifts im Kryostaten mit- hilfe von Ensembles	21
4.3.2. Nachweis der Detektierbarkeit einzelner Farbzentren.	26
5. Ausblick	29
A. Anhang	31
A.1. Justage des konfokalen Mikroskops	31
A.2. Betrieb des Kryostaten	32
A.2.1. Vorkühlung	32
A.2.2. Vorbereitung des Inserts	32
A.2.3. Montage des Inserts und Kühlen auf 5 K	33
A.2.4. Kühlen auf 1,5 K	34

Inhaltsverzeichnis

A.2.5. Kühlen auf Basistemperatur	34
A.2.6. Aufwärmen	34
A.3. Herstellung von Kabelsträngen	35
A.4. Absorptionsspektren der Filter	37

Abkürzungen

APD Avalanche-Photodiode

EOM elektrooptischer Modulator

LHe flüssiges Helium

LN flüssiger Stickstoff

POI interessanter Punkt (point of interest)

PSF Punktverteilungsfunktion (point-spread-function)

SIL Festkörper-Immersionlinse (solid immersion lens)

ZPL Null-Phononen-Übergang (zero-phonon-line)

Abbildungsverzeichnis

2.1. Diamantgitter mit NV-Zentrum	3
2.2. Energieniveaus des NV ⁻ -Zentrums.	4
2.3. Diamantgitter mit SiV-Zentrum	4
2.4. Energieniveaus des SiV-Zentrums.	5
2.5. Auswirkungen der Punktverteilungsfunktion (PSF). [Def06]	6
2.6. Prinzip der Festkörper-Immersionlinse.	6
3.1. Schematischer Aufbau des Lasersystems.	8
3.2. Lasersystem.	8
3.3. Schematischer Aufbau des konfokalen Mikroskops.	9
3.4. konfokales Mikroskop	10
3.5. Schematischer Aufbau der Detektion.	11
3.6. Detektionsaufbau	12
3.7. Kryostat und Insert.	13
3.8. Kabel und Fasern im Kryostat.	14
4.1. Fluoreszenz von NV-Nanodiamanten.	17
4.2. Fluoreszenz eines einzelnen Nanodiamanten.	17
4.3. Temperatur während des Kühlens von NV-Nanodiamanten.	18
4.4. Fluoreszenz-Spektrum von NV-Nanodiamanten.	18
4.5. Gesamtintensität der Spektren.	19
4.6. Temperaturabhängigkeit der Wellenlänge.	20
4.7. Relative Intensität der ZPL	21
4.8. Fluoreszenz von Diamant-Nanosäulen.	22
4.9. Temperatur während der Messungen an SiV-Zentren.	22
4.10. Verschiebung der gemessenen Position der Probe während des Kühlens.	23
4.11. Positionen der Stepper während des Kühlens.	25
4.12. Intensität der Fluoreszenz und Temperatur im Vergleich.	25
4.13. Aufnahme der Fluoreszenz von einzelnen SiV-Zentren.	26
4.14. Autokorrelationsfunktion der Fluoreszenz.	27
A.1. Schematische Darstellung der Ventile am Kryostaten.	33
A.2. Skizze zur Herstellung von Kabelsträngen. [Bal15]	35
A.3. Optische Dichte des Semrock FF01-716/43.25 Filters.	37
A.4. Optische Dichte des Semrock FF01-680/42-25 Filters.	37
A.5. Optische Dichte des Semrock FF01-715/LP-25 Filters.	38
A.6. Optische Dichte des Chroma ET775/50x Filters.	38

1. Einleitung

Sei es Online-Banking, die Übertragung persönlicher Daten im Internet oder einfach nur der Schutz privater E-Mails: Verschlüsselung ist aus unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Dabei basieren heutige Verfahren auf komplexen Problemen, deren Lösung mit aktuellen Rechnern nicht in sinnvoller Zeit zu finden ist. Ausgenutzt wird insbesondere, dass die Anzahl der möglichen Kombinationen für einen Schlüssel exponentiell mit der Zahl der Stellen wächst. Erhöht sich die Leistungsfähigkeit moderner Rechner, müssen also immer längere Schlüssel genutzt werden. Eine weitere Schwachstelle heutiger Verschlüsselungen ist, dass die gleichen Schlüssel mehrfach genutzt werden.

Einige der heute komplexen Probleme könnten mit Quantencomputern deutlich schneller gelöst werden, wie z. B. die Zerlegung großer Zahlen in Primfaktoren mit dem Shor-Algorithmus. Es stellt sich also die Frage, wie in Zukunft die sichere Übertragung von Daten geschehen kann.

Glücklicherweise bietet auch hier die Quantenmechanik eine Lösung: Nach dem No-Cloning-Theorem ist es nicht möglich, einen Quantenzustand perfekt zu kopieren. Wenn also Quantenzustände übertragen werden, ist es nicht möglich diese Verbindung abzuhören, ohne die Übertragung selbst zu stören. Auf diese Weise kann ein einmal zu verwendender Schlüssel ausgetauscht werden, um damit die zu übertragenden Daten zu verschlüsseln.

Dazu notwendig ist die Übertragung und Verschränkung von Qubits zwischen den Endpunkten der Verschlüsselung. Diese Übertragung wurde zwar bereits technisch realisiert, ist jedoch auf ca. 200-300 km limitiert. Dies wird durch die sog. TGW-Grenze beschrieben [TGW14; AML16; Pir+17]. Größere Strecken und Netzwerke müssen dabei über „trusted nodes“ realisiert werden, also Knotenpunkte, die Informationen weiterleiten und klassisch gegen Abhören gesichert sind.

Eine Alternative dazu bieten Quantenrepeater [Luo+16]. Diese Art von Netzwerkknoten ermöglicht mittels Verschränkung einen direkten Schlüsselaustausch über beliebig viele Knoten hinweg, ohne dabei selbst den ausgetauschten Schlüssel zu kennen. Der Q.Link.X-Verbund (Quantum Link Extended), dem auch die Universität Mainz angehört, arbeitet an der Demonstration solcher Quantenrepeater-Zellen. Dabei werden drei verschiedene Ansätze getestet: Neben Halbleiter-Quantenpunkten und gespeicherten Atomen und Ionen sind Diamant-Farbzentren ein vielversprechender Kandidat für die Realisierung von Quantenrepeater-Zellen.

Von den über 500 bekannten Farbzentren [Aha+11] zeigen einige besonders nützliche

1. Einleitung

Eigenschaften. Das wohl bekannteste Farbzentrum ist das Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum (NV-Zentrum), welches neben dem hier beabsichtigten Einsatz u. a. auch zur Magnetometrie [Wic+16; Cha+17] eingesetzt werden kann. Allerdings ist die Konvertierungsrate in kohärente Photonen eher gering, weswegen der Einsatz von optischen Resonatoren vorgeschlagen wurde [Rie+17]. Das zweite hier verwendete Farbzentrum ist das Silizium-Fehlstellen-Zentrum. Der Null-Phononen-Übergang (ZPL) ist hier deutlich stärker, allerdings sind die Kohärenzzeiten bei Raumtemperatur zu gering, um als Quantenspeicher nützlich zu sein. Selbst bei Temperaturen um 5 K konnten lediglich Kohärenzzeiten von ca. 45 ns erreicht werden [Rog+14b; Pin+14].

Ziel des Experiments in Mainz ist zunächst, mittels „coherent population trapping“ (CPT) [Jah15] die Kohärenzzeiten bei niedrigeren Temperaturen zu bestimmen. Dazu wurde ein konfokales Mikroskop in einen Entmischer-Kryostaten eingebaut. Es sollen Temperaturen um die 100 mK erreicht werden. Während der Arbeiten an dieser Masterarbeit konnten an der Harvard Universität in Cambridge Kohärenzzeiten von über 10 ms demonstriert werden [Suk+17].

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden zunächst die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Farbzentren beleuchtet sowie ein Überblick über die Funktionsweise von konfokalen Mikroskopen gegeben. In Kapitel 3 wird insbesondere der Aufbau des Experiments, bestehend aus Laseraufbau, konfokalem Mikroskop und Detektionsaufbau beschrieben. Es wird weiterhin darauf eingegangen, wie das an der Universität Ulm entwickelte konfokale Mikroskop in den vorhandenen Kryostaten eingebaut und in Betrieb genommen wurde. In Kapitel 4 wird auf die durchgeführten Messungen eingegangen. Zunächst wurde die Fluoreszenz von Nanodiamanten mit Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) aufgenommen. Diese Nanodiamanten wurden dann auf 12 K gekühlt. Während des Kühlvorgangs wurde das Fluoreszenzspektrum der NV-Zentren vermessen. In einer zweiten Messreihe wurden Silizium-Fehlstellen-Zentren (SiV-Zentren) auf ca. 100 K gekühlt und währenddessen ihre Position verfolgt, um die relativen Bewegungen des Mikroskops zu quantifizieren. Es wurde außerdem gezeigt, dass das Mikroskop in der Lage ist, einzelne Farbzentren aufzulösen.

Im Anhang befinden sich darüber hinaus praktische Hinweise zur Justage des konfokalen Mikroskops, zur Bedienung des Kryostaten und zur Herstellung von Kabelsträngen zur Verwendung im Kryostaten. Außerdem finden sich dort die Absorptionskurven der verwendeten optischen Filter.

2. Eigenschaften von Farbzentren und konfokalen Mikroskopen

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Farbzentren und konfokalen Mikroskopen gegeben. Dabei wird zunächst auf den Aufbau und die Eigenschaften von Stickstoff- und Silizium-Farbzentren eingegangen. Danach folgt ein Überblick einige grundlegende Eigenschaften von konfokalen Mikroskopen.

2.1. Stickstoff-Farbzentren (NV) in Diamant

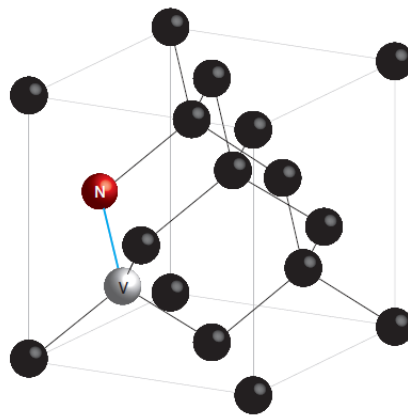


Abbildung 2.1.: Diamantgitter mit NV-Zentrum. Kohlenstoff ist schwarz dargestellt, Stickstoff rot, die Fehlstelle grau und die Symmetrieachse blau. [Ver14]

Als Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum (nitrogen-vacancy center, NV-Zentrum) bezeichnet man einen Gitterfehler in Diamant, bei dem ein Stickstoff-Substitutionsatom neben einer Leerstelle liegt [Doh+13]. Schematisch ist dies in Abbildung 2.1 dargestellt.

NV-Zentren existieren in zwei Ladungszuständen: Das neutrale NV^0 -Zentrum zeigt eine Null-Phononen-Übergang (zero-phonon-line, ZPL) bei 575 nm [Mit96]. Das negativ geladene NV^- -Zentrum hingegen zeigt eine ZPL bei 637 nm [Gru+97].

Die Energieniveaus der negativ geladenen NV-Zentren wie in Doherty u. a. [Doh+11] beschrieben sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Grundzustand ist ein Triplet-Zustand 3A_2 , darüber liegt ein angeregter Triplet-Zustand 3E . Ein Laser der Wellenlänge $\lambda = 532$ nm kann das Farbzentrum in die phononischen Seitenbänder des

2. Eigenschaften von Farbzentren und konfokalen Mikroskopen

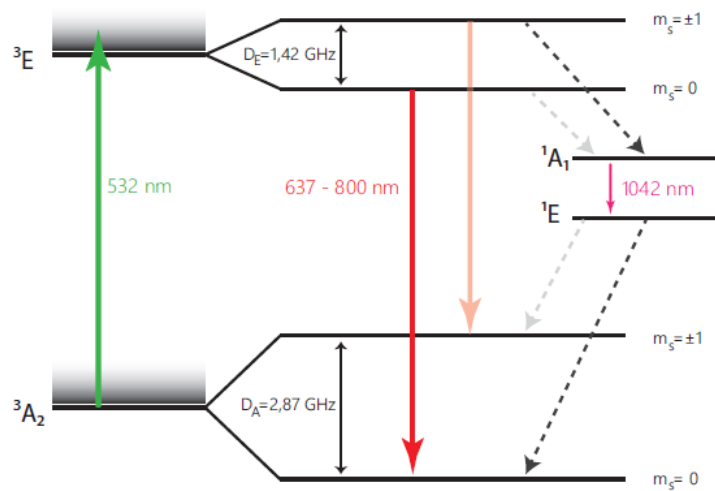


Abbildung 2.2.: Energieniveaus des NV^- -Zentrums. Unwahrscheinlichere Übergänge sind blass eingezeichnet. [Ver14]

3E -Zustands anregen, aus denen es innerhalb von Femtosekunden in den 3E -Zustand zurückfällt. Vom 3E -Zustand existiert ein Fluoreszenzübergang zurück in den Grundzustand. Dieser hat eine Lebensdauer von etwa 12 ns [CTJ83]. Parallel dazu existiert noch ein Übergang über zwei Metastabile Singulett-Zustände 1A_1 und 1E zurück in den Grundzustand. Dieser Übergang hat eine Lebensdauer von 220 ns [Aco+10].

2.2. Silizium-Farbzentren (SiV) in Diamant

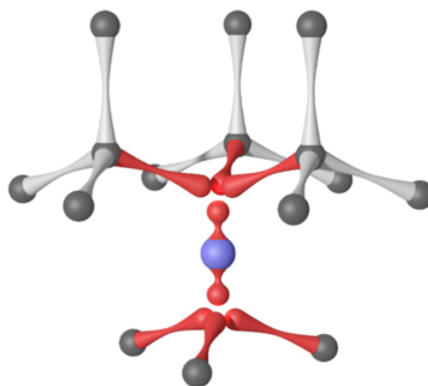


Abbildung 2.3.: Diamantgitter mit SiV-Zentrum. Kohlenstoff ist schwarz dargestellt, Silizium rot. [Rog+14b]

Das Silizium-Fehlstellen-Zentrum (silicon-vacancy center, SiV-Zentrum) bezeichnet

ähnlich dem NV-Zentrum einen Gitterfehler in Diamant. Allerdings besteht es aus einem Silizium-Atom anstelle von zwei benachbarten Kohlenstoff-Atomen. Das Silizium befindet sich hierbei zentral als Zwischengitteratom zwischen den beiden leeren Gitterplätzen (siehe Abbildung 2.3).

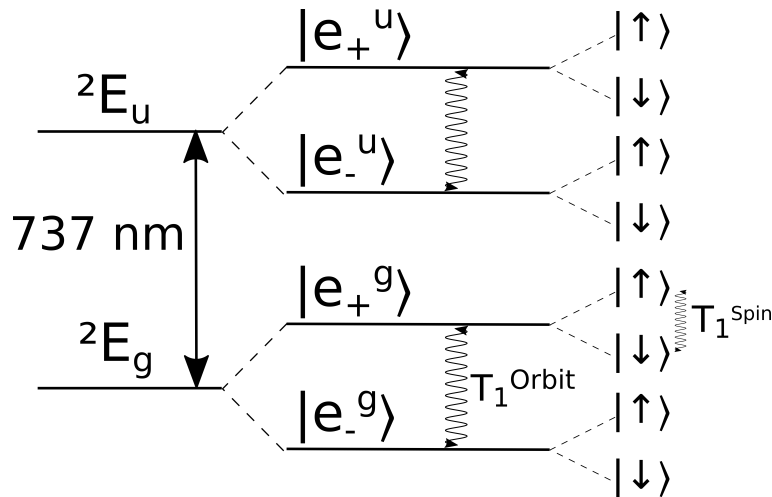


Abbildung 2.4.: Energieniveaus des SiV-Zentrums.

SiV-Zentren zeigen eine ZPL bei 737 nm, die sich bei kryogenen Temperaturen in mehrere Linien aufspalten [Neu+13; Rog+14a]. Dies lässt sich anhand der Energieniveaus verstehen, wie sie auch schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt sind [Rog+14b; Jah+15; Hep+13]: Sowohl der Grundzustand 2E_g als auch der angeregte Zustand 2E_u spalten sich in zwei Unterzustände e_+ und e_- , welche sich wiederum jeweils in zwei Spinzustände aufspalten [Hep+13]. Da die Linienbreite stark temperaturabhängig ist, kann diese Aufspaltung jedoch erst bei kryogenen Temperaturen aufgelöst werden.

2.3. konfokale Mikroskopie

Beim konfokalen Mikroskop wird Anregungslicht durch ein Objektiv auf die Probe fokussiert. Emissionslicht von der Probe wird vom gleichen Objektiv aufgesammelt und kollimiert. Dadurch ergibt sich im Gegensatz zu Lichtmikroskopen ein um einen Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ reduziertes Auflösungslimit [SS97; CS04].

Das Auflösungslimit beträgt somit:

$$FWHM = \frac{0.37\lambda}{NA}$$

Wobei λ das geometrische Mittel der verwendeten Wellenlängen und NA die numerische Apertur des Objektivs ist.

2. Eigenschaften von Farbzentren und konfokalen Mikroskopen

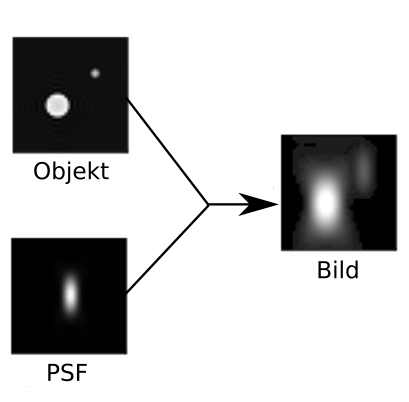


Abbildung 2.5.: Auswirkungen der Punktverteilungsfunktion (PSF). [Def06]

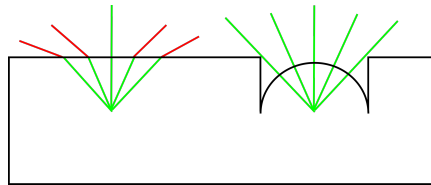


Abbildung 2.6.: Prinzip der Festkörper-Immersionlinse (SIL). Links: Strahlen werden am Übergang vom optisch dichteren Medium (Diamant) zum optisch dünneren Medium (Luft) von der Symmetrieachse weg gebrochen. Ein darüber platziertes Objektiv hat also effektiv eine geringere numerische Apertur (NA). Rechts: Durch Verwendung einer SIL wird die Brechung verhindert und die effektive NA entspricht der NA des Objektivs.

Das in diesem Experiment verwendete Objektiv hat eine NA von 0.85. Es ergibt sich damit für Anregungslicht der Wellenlänge $\lambda = 532$ nm und Emissionslicht von NV-Zentren mit $\lambda = 637$ nm ein theoretisches Auflösungslimit von

$$FWHM = 253.4 \text{ nm}$$

Für Silizium-Farbzentren mit $\lambda = 737$ nm

$$FWHM = 272.6 \text{ nm}$$

Durch den Brechungsindex von Diamant von $n = 2.4$ verringert sich durch die Brechung an der Oberfläche jedoch die effektive NA des Objektivs. Diesem Effekt kann mit einer Festkörper-Immersionlinse (solid immersion lens, SIL) wie in Abbildung 2.6 dargestellt entgegengewirkt werden.

3. Aufbau des Experiments

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Experiments beschrieben. Dabei wird der optomechanische Aufbau in die drei Teile Laseraufbau, konfokales Mikroskop und Detektion unterteilt. In einem weiteren Abschnitt wird der verwendete Kryostat beschrieben und insbesondere auf die zusätzlich verbauten Teile eingegangen.

3.1. Optomechanischer Aufbau

Der optomechanische Aufbau besteht aus drei, unabhängig voneinander arbeitenden Teilen. Der erste Teil stellt einen Laseraufbau dar, indem das verwendete Laserlicht erzeugt und in eine Glasfaser eingekoppelt wird. Der zweite Teil, das konfokale Mikroskop, befindet sich vollständig im Inneren des Kryostaten und wird gemeinsam mit der Probe gekühlt. Über eine weitere Glasfaser gelangt das im Mikroskop aufgesammelte Licht in den Detektionsaufbau, wo es gefiltert und durch eine Avalanche-Photodiode (APD) detektiert wird.

3.1.1. Laseraufbau

Der schematische Aufbau des Lasersystems ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Ein Bild des Aufbaus ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Zum Einsatz kommen zum einen ein Festkörperlaser (Modell CNI-532-200-5-LED) mit einer festen Wellenlänge von 532 nm und zum anderen ein Diodenlaser (Toptica DL pro) mit einer Wellenlänge von 737 nm (Verstimmbar im Bereich 726-741 nm). Der Strahl des 532 nm Lasers wird mit einem Bandpass-Filter (Thorlabs, FL532-10) gefiltert, um Strahlungsanteile neben der eigentlichen Laserlinie um > 40 dB abzuschwächen (d. h. $< 0.01\%$ Transmission). Vom Strahl des 737 nm Lasers werden zunächst ca. 0.7% (55 μ W) mit einem Strahlteiler (Thorlabs WW11050) in eine Faser zum Wellenlängen-Messgerät (HighFinesse/Ångstrom, WS6-200) geleitet. Der Hauptstrahl wird mit einer $\lambda/2$ -Platte in der Polarisierung gedreht und dann mit einem polarisierenden Strahlteiler geteilt. Ein Teil wird über eine Faser zu einem optischen Resonator geleitet um ein Fehlersignal zur Frequenzstabilisierung des Lasers zu erhalten. Details zu diesem Aufbau befinden sich in Herrmann [Her17]. Ein Umbau auf eine Stabilisierung nach dem Pound-Drever-Hall-Verfahren befindet sich zur Zeit in Arbeit. Der zweite Teilstrahl durchläuft einen Filter (Semrock, FF01-716/43.25, Filterkurve befindet sich im Anhang in Kapitel A.4), welcher insbesondere eine Unterdrückung

3. Aufbau des Experiments

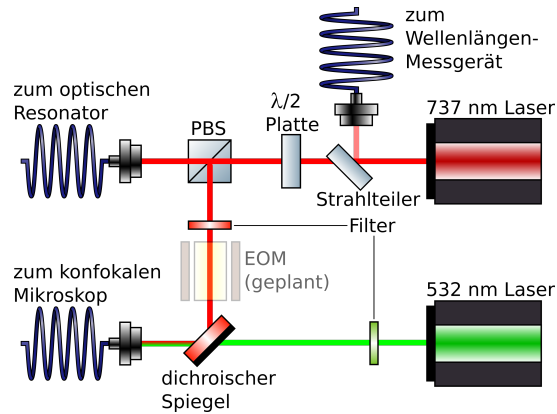


Abbildung 3.1.: Schematischer Aufbau des Lasersystems. Ein Teilstrahl des 737 nm Lasers wird zwecks Frequenzstabilisierung zum optischen Resonator geleitet. Der andere Teilstrahl wird mit dem Strahl des 532 nm Lasers überlagert und in eine Faser zum konfokalen Mikroskop eingekoppelt.

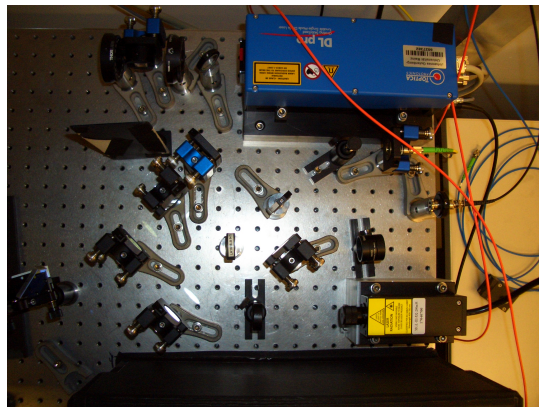


Abbildung 3.2.: Aufbau des Lasersystems. Oben rechts im Bild befindet sich der 737 nm Laser, unten rechts befindet sich der 532 nm Laser.

3.1. Optomechanischer Aufbau

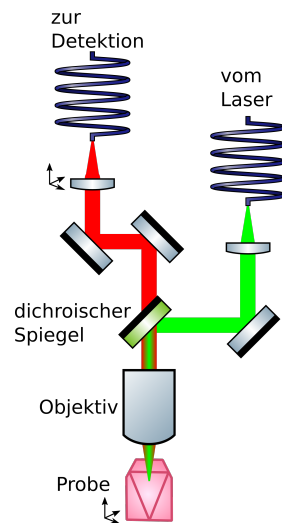


Abbildung 3.3.: Schematischer Aufbau des konfokalen Mikroskops. Anregungslicht (hier grün dargestellt) aus einer Faser wird kollimiert, über Spiegel in ein Objektiv geleitet und auf die Probe fokussiert. Emissionslicht (rot) aus der Probe wird vom gleichen Objektiv aufgesammelt, über einen dichroischen Spiegel vom Anregungslicht getrennt und in eine zweite Faser eingekoppelt. Probe und Einkoppellinse sind mit Piezo-Positionierern verschiebbar.

von Wellenlängen >738 nm bewirkt. Der Strahl wird dann mit dem 532 nm Strahl überlagert. Ein Spiegel mit Reflexbeschichtung für 602 nm und 737 nm (Laseroptik, L-14305) dient hier als dichroischer Spiegel. Beide Strahlen werden gemeinsam mit einem Faserkoppler (Schäfter+Kirchhoff, 60FC-F-4-A7.5-02) in eine Singlemode-Faser (Schäfter+Kirchhoff, PMC-630-4.2-NA012-3-APC-700-P, 7 m) eingekoppelt und zum konfokalen Mikroskop geleitet.

Der Aufbau bietet insbesondere zwei Vorteile: Zunächst kann über die Einstellung der $\lambda/2$ -Platte die Intensität des Resonator-Strahls bzw. des Experiment-Strahls eingestellt werden. Dies hat sich beim Aufbau des optischen Resonators als äußerst nützlich erwiesen. Darüber hinaus bietet die gemeinsame Einkopplung in eine Faser eine einfache Möglichkeit zwischen resonanter (737 nm) und offresonanter (532 nm) Anregung umzuschalten, ohne Faserkabel umstecken zu müssen. Ein Nachteil der sich daraus ergibt ist, dass durch die Verwendung eines Faserkopplers für 737 nm und einer Faser für 737 nm ca. 93% der Intensität des 532 nm Strahls verloren gehen.

In den Aufbau soll zusätzlich noch ein elektrooptischer Modulator (EOM) eingebaut werden, um Seitenbänder auf dem 737 nm Strahl zu erzeugen.

3. Aufbau des Experiments

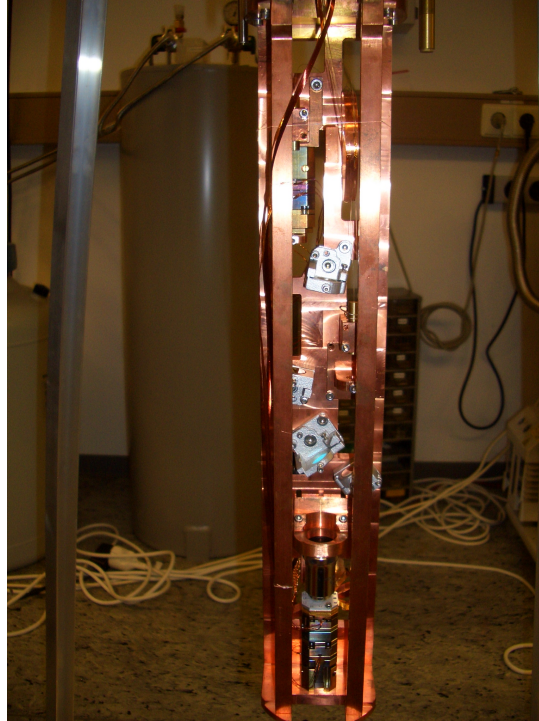


Abbildung 3.4.: Das konfokale Mikroskop.

3.1.2. Konfokales Mikroskop

Der schematische Aufbau des konfokalen Mikroskops ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Ein Bild des Mikroskops ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Es wurde an der Universität Ulm in der Arbeitsgruppe von Prof. Jelezko entwickelt und in Mainz am Kryostat an gebracht und in Betrieb genommen. Anregungslicht aus einer Faser (Thorlabs PM630-HP, 4 m) wird durch eine Linse (Thorlabs, AC080-016-B) kollimiert und über einen Silberspiegel (Thorlabs, PF05-03-P01) und einen dichroischen Spiegel (Thorlabs, DMLP605T) auf ein Objektiv (Newport M-60X) gelenkt, welches das Licht dann auf die jeweils eingebaute Probe fokussiert. Von der Probe zurückgeworfenes Licht wird vom gleichen Objektiv aufgesammelt, wobei Licht aus der Fokusebene des Objektivs wieder zu einem kollimierten Strahl wird. Der dichroische Spiegel transmittiert Licht mit Wellenlängen >605 nm, welches mit zwei weiteren Silberspiegeln und einer Linse (Thorlabs, AC127-050-B) in eine Multimode-Faser (Thorlabs FG050UGA, 4 m) eingekoppelt wird. Die zweite Faser dient dabei gleichzeitig als Pinhole und filtert auf diese Weise Licht heraus, welches nicht aus der Fokusebene des Objektivs stammt. Um das Mikroskop auch bei Temperaturänderungen konfokal zu halten, ist die Einkoppellinse vor der Multimode-Faser beweglich in 3 Achsen auf Piezo-Nanopositionierern gelagert (attocube, 2x ANPx101/RES/LT, 1x ANPz102/RES/LT). Diese Positionierer halten ohne angelegte Spannung ihre Position und bewegen bei angelegter Sägezahnspannung die Linse um bis zu 5 mm in jeder Achse. Sie können von außen, d.h. selbst bei kryoge-

3.1. Optomechanischer Aufbau

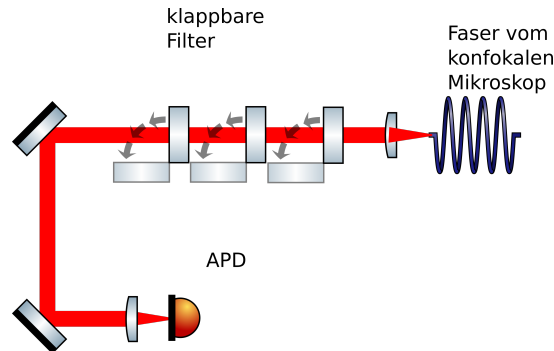


Abbildung 3.5.: Schematischer Aufbau der Detektion. Licht aus der Faser vom Experiment wird kollimiert, kann dann mit einer Reihe von klappbaren Filtern gefiltert werden und trifft auf eine APD.

nen Temperaturen, angesteuert werden und stellen so sicher, dass ein Nachjustieren des Mikroskops möglich ist. Um die Probe bzw. die Farbzentren im Fokus des Objektivs positionieren zu können, ist die Probe ebenfalls auf einem Stapel aus Nanopositionierern (ebenfalls attocube, gleiche Modelle) und zusätzlich auf einem Piezo-Scanner (attocube ANSxyz100/LT) montiert. Der zusätzliche Scanner hat einen Scanbereich von $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 24\ \mu\text{m}$ bei Raumtemperatur bzw. $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ bei kryogenen Temperaturen und ist in der Lage, die Probe mit sub-Nanometer Präzision zu positionieren, was deutlich unter dem Auflösungslimit des Mikroskops liegt.

Zu erwähnen ist, dass während der Messungen an NV-Zentren anstelle des dichroischen Spiegels zunächst ein Beam-Sampler (Thorlabs, BSF05-B) verbaut war. Dies hat den Hintergrund, dass eine Anregung mit resonantem Licht von $737\ \text{nm}$ geplant ist. Der jetzt eingebaute dichroische Spiegel bietet gegenüber dem Beam-Sampler bei offresonanter Anregung mit $532\ \text{nm}$ etwa die 20-fache Leistung am Objektiv, sowie eine zusätzliche wellenlängenabhängige Filterung vor dem Einkoppeln in die Multimode-Faser. Anregungslicht mit $532\ \text{nm}$ wird dabei um einen Faktor von ca. 10^5 abgeschwächt. Inwieweit damit eine resonante Anregung möglich ist, muss in weiteren Experimenten überprüft werden.

Eine Anleitung zur Justage des konfokalen Mikroskops findet sich im Anhang in Kapitel A.1.

3.1.3. Detektionsaufbau

Das Schema des Detektionsaufbaus ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Ein Bild des Aufbaus ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Licht vom konfokalen Mikroskop kommt aus einer Multimode-Faser (Thorlabs, FG050-UGA, 10 m) und wird mit einer Linse (Lens-Optics, BK7 Bikonvex, $f=25\ \text{mm}$, AR/AR 602 & 737 nm) kollimiert. Dann können je nach Bedarf verschiedene Filter in den Strahlengang geklappt bzw. gestellt werden, bevor das Licht von einer weiteren Linse (Thorlabs, LA1131-B) auf eine APD (PerkinElmer,

3. Aufbau des Experiments

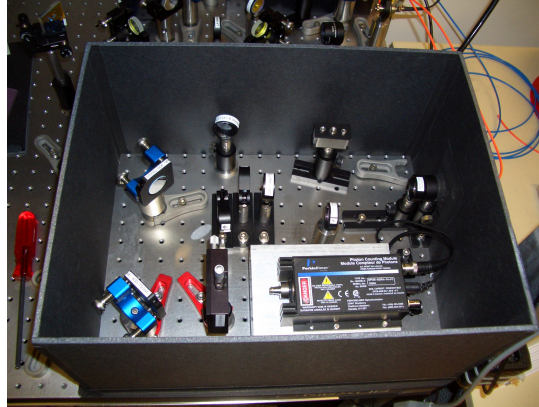


Abbildung 3.6.: Der Detektionsaufbau. Unten rechts im Bild ist die APD zu erkennen.

SPCM-AQRH-14-FC) fokussiert wird. Aufgrund der hohen Sensitivität der APD (65% photon detection efficiency bei 650 nm) ist der Detektionsaufbau vollständig in einem möglichst lichtundurchlässigen Kasten eingeschlossen.

Als Filter kommen zur Zeit zum Einsatz (Die Absorptionsspektren soweit bekannt befinden sich im Anhang in Kapitel A.4):

- 650 nm Longpass (Thorlabs, FELH0650)
→ reflektiert 532 nm Anregung, transmittiert Fluoreszenz von NV-Zentren
- 680 nm Bandpass (Semrock, FF01-680/42-25)
→ zusätzliche Möglichkeit die Fluoreszenz von NV-Zentren nachzuweisen
- 715 nm Longpass (Semrock, FF01-715/LP-25)
→ reflektiert 532 nm Anregung, transmittiert Fluoreszenz von SiV-Zentren
- 775 nm Bandpass (chroma, ET775/50x)
→ reflektiert 532 nm & 737 nm Anregung, transmittiert Seitenband-Fluoreszenz von SiV-Zentren

Für die Detektion von NV- und SiV-Zentren bei offresonanter Anregung sind die beiden Longpass-Filter ausreichend. Zusätzliche Filter können den Kontrast jedoch verbessern. Für die Detektion von SiV-Zentren bei resonanter Anregung ist wichtig, dass das Anregungslicht, welches z. B. durch Reflektion an der Diamantoberfläche in die Detektionsfaser gelangt, möglichst gut herausgefiltert wird. Die Kombination aus 716 nm Bandpass im Laseraufbau vor dem Mikroskop und 775 nm Bandpass im Detektionsaufbau nach dem Mikroskop soll dies ermöglichen.

3.2. Kryostat

Um das konfokale Mikroskop mit der jeweils eingebauten Probe zu kühlen, kommt ein Entmischer-Kryostat der Firma Oxford (Modell Kelvinox 100) zum Einsatz (sie-

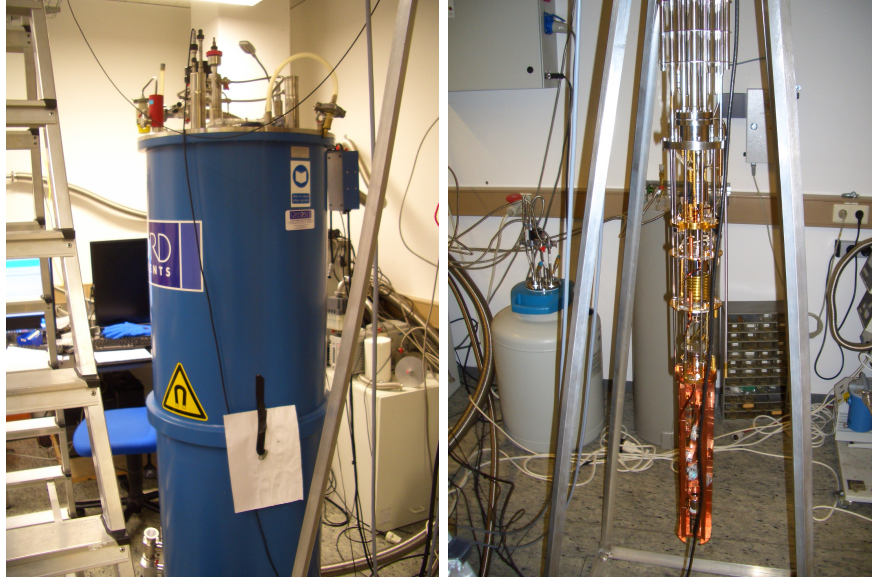


Abbildung 3.7.: Links: Der Kryostat. Rechts: Das experimentelle Insert mit konfokalem Mikroskop.

he Abbildung 3.7). Detaillierte Informationen zum Funktionsprinzip finden sich in Batey, G. Teleberg [Bat]. Dieser Kryostat bietet die Möglichkeit, das konfokale Mikroskop mit flüssigem Stickstoff (ca. 77 K), flüssigem Helium (ca. 5 K), flüssigem Helium mit zusätzlicher Vakuumpumpe (ca. 1 K) oder dem Entmischer-Mechanismus zu kühlen. Der Entmischer-Mechanismus erreicht dabei laut Hersteller 15 mK. Ein erster eigener Versuch (zu dieser Zeit noch ohne konfokales Mikroskop) erreichte 23 mK. Dabei sei erwähnt, dass die erreichte Temperatur wesentlich von der eingebrachten Wärmeleistung abhängt, so wurde die Kühlleistung vom Hersteller gemessen als $100 \mu\text{W}$ bei 98 mK und $128 \mu\text{W}$ bei 100 mK. Insbesondere die eingebrachte Laserleistung und die elektrische Leistung, die zum Bewegen der Probe notwendig ist, muss also auf ein Minimum reduziert werden, wenn niedrige Temperaturen erreicht werden sollen. Ziel des Experiments ist es, Temperaturen um die 100 mK zu erreichen.

Eine Kurzanleitung zur Bedienung des Kryostaten befindet sich im Anhang in Kapitel A.2.

Zusätzlich wurden im Kryostat Glasfasern und Kabel verlegt (siehe Abbildung 3.8), um das konfokale Mikroskop betreiben zu können. Bei den Kabeln handelt es sich zum einen um Kupferdrähte mit einem Durchmesser von 0.22 mm und zum anderen um Drähte aus Niob-Titan in einer Kupfermatrix mit einem Durchmesser von 0.15 mm. Letztere werden ab einer Temperatur von ca. 10 K supraleitend. Beide Drahtarten wurden wie in Balshaw [Bal15] beschrieben und im Anhang in Kapitel A.3 zusammengefasst zu Kabelsträngen verarbeitet.

Bei den Fasern handelt es sich um polarisationserhaltende Singlemode-Fasern

3. Aufbau des Experiments

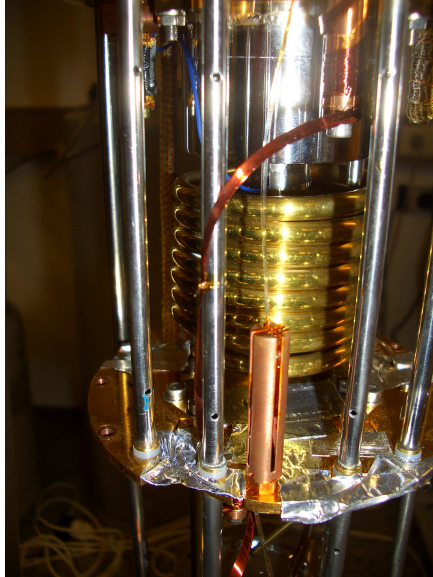


Abbildung 3.8.: Teil des experimentellen Inserts. Im Bild zu erkennen sind einer der verlegten Kabelstränge und das Glasfaserbündel in einem der eingebauten Kupferhalter.

(Thorlabs PM630-HP) für das Anregungslicht sowie Multimode-Fasern (Thorlabs FG050UGA) für das Fluoreszenzlicht. Außerdem wurden noch einige Ersatz-Fasern, teilweise auch für andere Wellenlängen verlegt, um ggf. Fasern ersetzen zu können oder auf andere Experimente vorbereitet zu sein.

4. Messungen und Ergebnisse

Der Detektionsaufbau (vgl. Kapitel 3.1.3) ermöglicht in Verbindung mit der beweglichen Probe (vgl. Kapitel 3.1.2) die orts aufgelöste Messung der Fluoreszenz. Dazu wird die Probe in einem Rasterverfahren und gleichzeitig die Zählrate der APD aufgenommen. Die Steuerung hierzu übernimmt „qudi“, eine an der Universität Ulm entwickelte, in Python geschriebene Software. Die Software kann die Zählrate der APD in Echtzeit anzeigen, orts aufgelöst in der xy- oder xz-Ebene aufnehmen und darstellen oder einem sog. „point of interest“ (kurz POI) folgen und dessen Bewegung darstellen.

4.1. Verwendete Proben

In den Messungen dieser Arbeit kamen drei verschiedene Proben zum Einsatz, eine Übersicht ist in Tabelle 4.1 zu finden.

Die erste Probe besteht aus Nanodiamanten mit jeweils > 300 NV-Zentren. Diese wurden in wässriger Suspension auf einen Objektträger aufgebracht und dort trocknen lassen. Die große Anzahl an NV-Zentren lässt die Nanodiamanten stark fluoreszieren. Die Nanodiamanten erscheinen aufgrund ihrer Größe von ca. 70 nm als punktförmige Lichtquellen und eignen sich damit besonders für die Justage des konfokalen Mikroskops.

Die zweite Probe besteht aus Diamantsäulen auf einem Silizium-Wafer. Diese Probe wurde an der Universität Kassel in der Arbeitsgruppe von Prof. Reithmaier und Dr. Popov gefertigt. Die Diamantschicht auf dem Silizium-Wafer wurde mittels chemischer Gasphasenabscheidung (HFCVD) hergestellt. Dabei wuchs zunächst innerhalb

Probe	NV/ SiV	single/ ensemble	Besonderheiten
Nanodiamanten	NV	ensemble	Nanodiamanten (Sigma-Aldrich, 798169), 70 nm Körnung, >300 NV-Zentren pro Partikel
Säulenprobe	SiV	ensemble	Diamant-Nanosäulen mit SiV-ensembles auf Silizium-Wafer. \varnothing 50-1000 nm
SIL-Probe	SiV	single	Diamantprobe mit einzeln auflösbaren SiV-Zentren, eingravierte SIL

Tabelle 4.1.: Liste der verwendeten Proben

4. Messungen und Ergebnisse

von drei Stunden Diamant ohne Silizium, gefolgt von zwei Minuten Diamant mit Zugabe von Silizium und im Anschluss weitere vier Minuten ohne die Zugabe von Silizium. Aus den so entstandenen Schichten wurde mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktivem Ionenätzen regelmäßige Säulenstrukturen gebildet. Details zum Fertigungsprozess können in [Fel+16] nachgelesen werden. Die fertige Probe besteht aus 5x5 Feldern mit Abständen von ca. 100 μm . Jedes Feld besteht aus 5x5 Säulen im Abstand von jeweils 10 μm . Die Säulen haben dabei je nach Feld Durchmesser von 50 nm, 100 nm, 200 nm, 500 nm oder 1000 nm, wobei die kleinsten Säulen aufgrund technischer Schwierigkeiten nicht vollständig ausgebildet sind. Für unsere Messung ergeben sich damit effektiv Ensembles von SiV-Zentren in regelmäßigem Abstand und klar definiertem Muster, was zur weiteren Justage aber auch zum Verfolgen von Drifts während des Kühlvorgangs günstig ist.

Die letzte Probe ist ein mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) gewachsener Diamant. Durch Zugabe von Silizium während des Wachstums entstanden darin einzelne SiV-Zentren. In diesen Diamanten wurden mit einem fokussierten Ionenstrahl (focused ion beam, FIB) mehrere SILs eingraviert. Diese erhöhen die aufgesammelte Fluoreszenz von darunterliegenden Farbzentren (siehe Kapitel 2.3) und erleichtern somit die Auflösung einzelner SiV-Zentren.

4.2. Stickstoff-Farbzentren (NV)

4.2.1. orts aufgelöste Fluoreszenzmessungen

Zur einfachen Justage des Mikroskops haben sich Nanodiamanten mit NV-Zentren als nützlich erwiesen. Verwendet wurden Nanodiamanten mit einer Partikelgröße von 70 nm und >300 NV Zentren pro Partikel (Sigma-Aldrich, 798169). Eine typische Aufnahme ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind größere Stellen mit hoher Fluoreszenz aber auch kleinere Stellen mit niedrigerer Fluoreszenz und regelmäßigerer Form. Bei den großen Stellen handelt es sich vermutlich um Ansammlungen mehrerer Nanodiamanten während die kleineren Stellen einzelne Nanodiamanten sein könnten. Aufgrund der Größe der Nanodiamanten unterhalb des Abbeschen Beugungslimits und der hohen Zahl an NV-Zentren pro Nanodiamant eignen sich diese besonders, um die Punktverteilungsfunktion (point-spread-function, PSF) zu bestimmen und zu optimieren. So können größere Ansammlungen schon mit sehr grober Justage des Mikroskops detektiert und mit deren Hilfe die Justage des Mikroskops verbessert werden. In Abbildung 4.2 ist eine solche optimierte Aufnahme mit justiertem Mikroskop zu sehen. Erkennbar ist vor allem, dass in der Aufnahme in der xz-Ebene die Punktspreizfunktion in z-Richtung relativ gerade ist, während bei Aufnahmen ohne Feinjustage i.d.R. eine schräge PSF zu erkennen ist, weil optische Achse und z-Achse des Piezo-Scanners nicht übereinstimmen. Ein Kurvenfit mit einer zweidimensionalen Normalverteilung ergab hier näherungsweise eine Halbwertsbreite von 1.88 μm in x- und 1.38 μm in y-Richtung. Dies liegt bereits nahe am theoretischen Auflösungslimit von 253.4 nm.

4.2. Stickstoff-Farbzentren (NV)

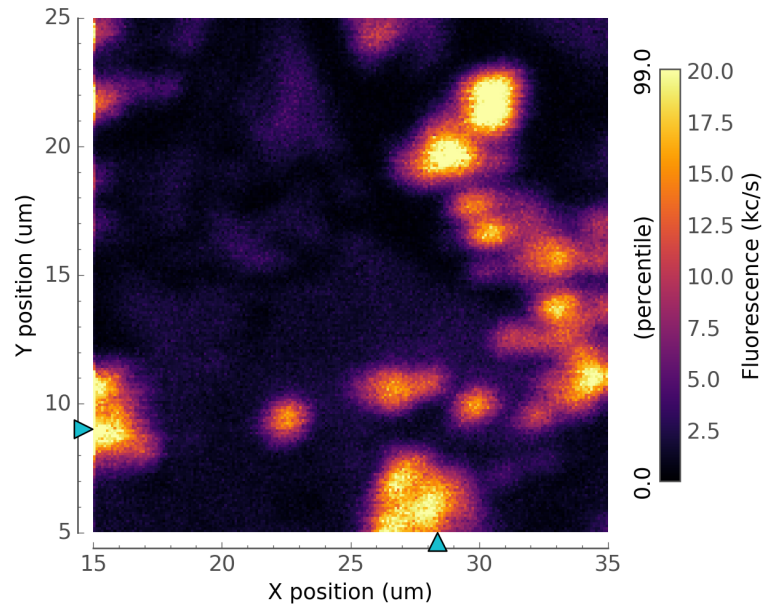


Abbildung 4.1.: Ortsaufgelöste Aufnahme der Fluoreszenz von Nanodiamanten mit NV-Zentren.

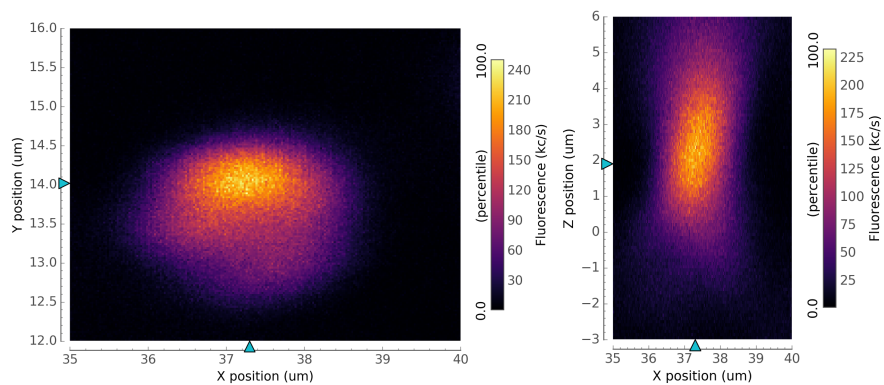


Abbildung 4.2.: Ortsaufgelöste Aufnahme eines vermutlich einzelnen Nanodiamanten. Dies entspricht der Punktspreizfunktion des Mikroskops. Links: xy-Ebene, rechts: xz-Ebene

4. Messungen und Ergebnisse

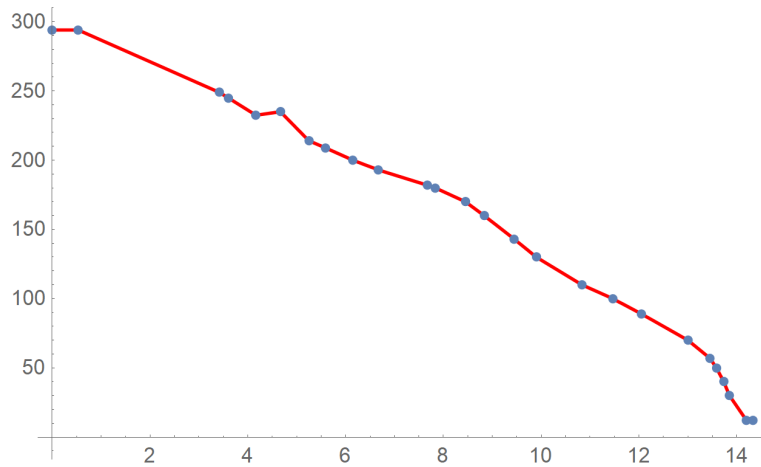


Abbildung 4.3.: Die Temperatur während des Kühlens. Gemessene Werte in blau, linear interpolierte Werte in rot.

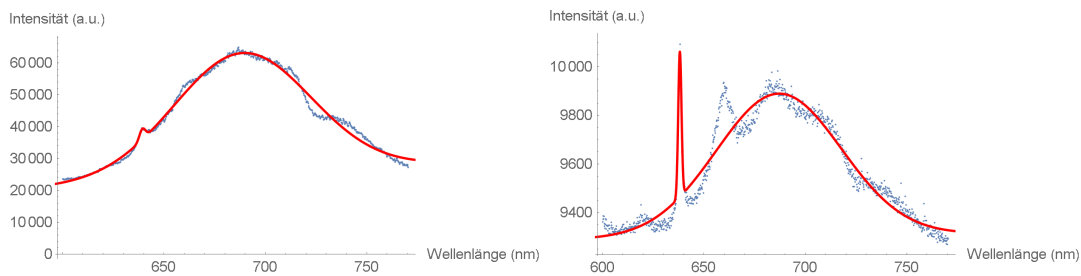


Abbildung 4.4.: Spektrum der Fluoreszenz von NV-Zentren in Nanodiamanten bei Raumtemperatur(links) und bei 12 K(rechts). Während bei Raumtemperatur die ZPL kaum erkennbar ist, ist sie bei 12 K klar als schmale Linie zu erkennen.

4.2.2. Temperaturabhängige Spektren.

In einer weiteren Messreihe wurde das Emissionsspektrum der NV-Nanodiamanten bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen. Dazu wurde zunächst eine Ansammlung von Nanodiamanten gesucht und das Mikroskop darauf eingestellt. Dann wurde anstelle des in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Detektionsaufbaus ein Spektrograph verwendet (LOT-Quantum Design; Shamrock 500 Spektrograph mit Newton CCD-Detektor). Damit konnte anstelle der reinen Intensitätsmessung das Spektrum der Fluoreszenz erfasst werden. Während des Kühlens von Mikroskop und Probe auf 12 K wurden automatisiert im Abstand von 30 Sekunden Spektren aufgenommen. Zwischendurch wurden diese Aufnahmen immer wieder unterbrochen und das Fluoreszenzlicht in den Detektionsaufbau geleitet. Damit wurden die Einkoppellinse nachjustiert und die Probe wieder auf die ursprünglich gefundene Ansammlung von Nanodiamanten gefahren um dem temperaturabhängigen Verziehen des Mikroskops entgegenzuwirken.

4.2. Stickstoff-Farbzentren (NV)

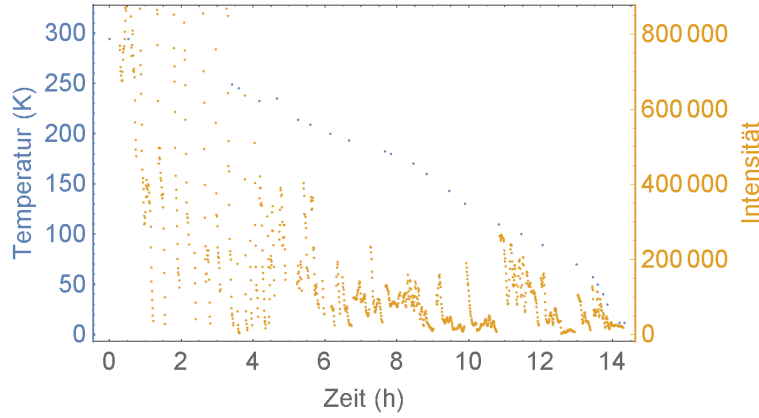


Abbildung 4.5.: Gesamtintensität von Spektrum incl. ZPL. Zu erkennen sind neben der allgemeinen fallenden Tendenz auch die Schwankungen durch regelmäßiges nachjustieren.

Schließlich wurde das Fluoreszenzlicht wieder in den Spektrographen geleitet und die Aufnahme von Spektren fortgesetzt. Parallel wurde die erreichte Temperatur gemessen (siehe Abbildung 4.3). Die so erhaltenen Werte wurden linear interpoliert um den aufgenommenen Spektren eine Temperatur zuzuordnen zu können. Die aufgenommenen Spektren wurden in der Auswertung mit einer Kurve der Form

$$f(\lambda) = A_1 * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + A_2 * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} + m\lambda + b \quad (4.1)$$

gefittet. Dabei besteht der Fit aus drei Teilen. Eine erste Normalverteilung, bestehend aus den Parametern A_1 , μ_1 und σ_1 , beschreibt das breite Emissionsspektrum der Farbzentren. Eine zweite Normalverteilung, bestehend aus den Parametern A_2 , μ_2 und σ_2 , beschreibt die ZPL. Der zusätzliche lineare Anteil wurde eingefügt, um Spektren mit schwächerer Gesamtintensität beschreiben zu können, bei denen ein zusätzlicher Untergrund insbesondere kürzerer Wellenlängen zu erkennen ist. Zwei der so aufgenommenen Spektren und die angepassten Kurven sind in Abbildung 4.4 zu sehen.

Passt man die Kurve in Gleichung 4.1 an die Spektren an, so ist $A_1\sigma_1$ ein Maß für die Anzahl der Photonen die außerhalb der ZPL detektiert wurden, während $A_2\sigma_2$ ein Maß für die Anzahl der Photonen innerhalb der ZPL ist. $A_1\sigma_1 + A_2\sigma_2$ ist damit ein Maß für die Gesamtzahl der emittierten Photonen. Diese Intensität wurde in Abbildung 4.5 gemeinsam mit der gemessenen Temperatur aufgetragen. Zu erkennen ist, dass bei sinkender Temperatur die Intensität abnimmt. Dieser Effekt erwies sich nach dem Aufwärmen des konfokalen Mikroskops zurück auf Raumtemperatur als nicht vollständig reversibel. Eine mögliche Erklärung dafür ist eine Dejustage des Mikroskops, die näher untersucht werden muss. Die starken Schwankungen auf kurzer Zeitskala entsprechen dem oben genannten wiederholten Nachjustieren. In regelmäßigen Abständen musste die Aufnahme von Spektren gestoppt werden und Einkoppellinse sowie Probe nachjustiert werden, um die maximale Intensität wieder herzustellen.

4. Messungen und Ergebnisse

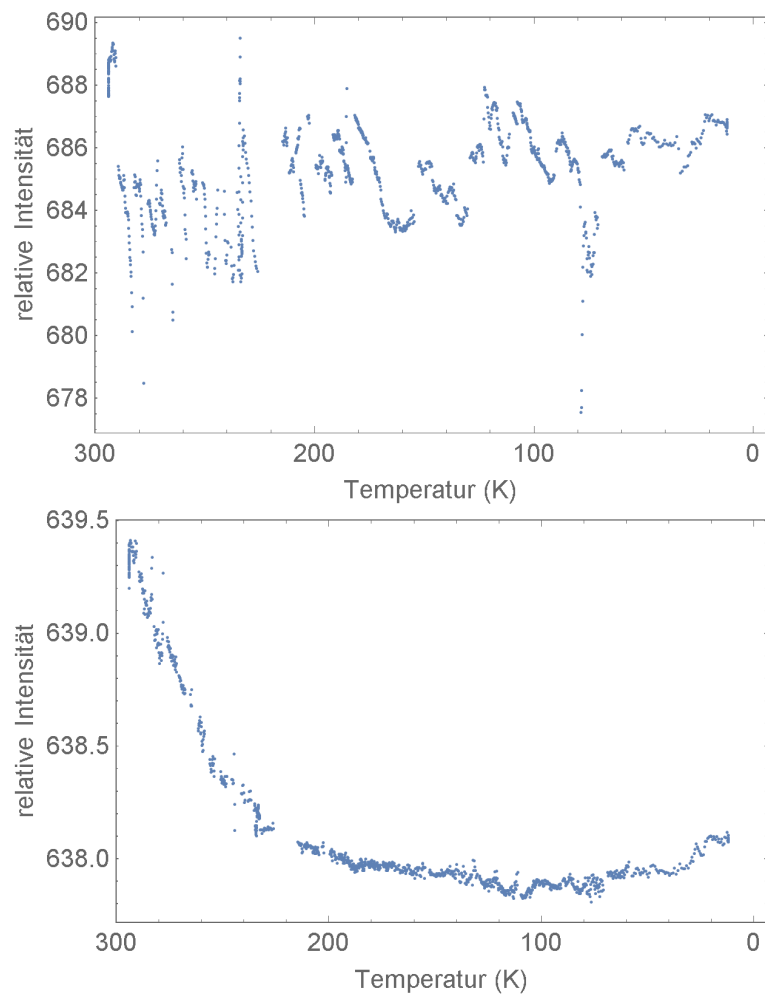


Abbildung 4.6.: Mittelwerte μ_1 des Spektrums (oben) und μ_2 der ZPL(unten), jeweils in Abhängigkeit der Temperatur.

4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)

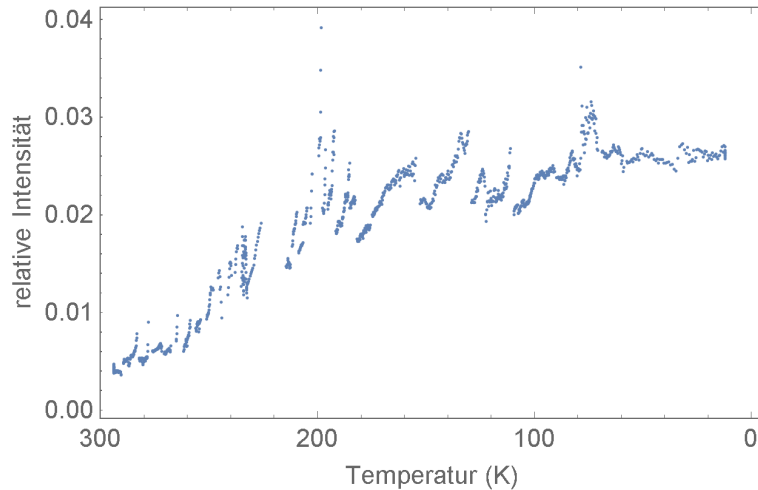


Abbildung 4.7.: Relative Intensität der ZPL gegenüber Zeit/Temperatur. Aufgetragen wurde $\frac{A_2\sigma_2}{A_1\sigma_1}$.

In Abbildung 4.6 wurden die Mittelwerte μ_1 und μ_2 gegen die Temperatur aufgetragen. Man erkennt deutlich, dass sich die Position der ZPL verschiebt. Beim Mittelwert μ_1 lässt sich kein eindeutiger Trend feststellen.

In Abbildung 4.7 wurde $\frac{A_2\sigma_2}{A_1\sigma_1}$ gegenüber Temperatur aufgetragen. Daran ist zu sehen, wie die relative Intensität der ZPL von ca. 0.5% auf ca. 3% ansteigt.

4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)

4.3.1. Messung der temperaturabhängigen Drifts im Kryostaten mithilfe von Ensembles

Nach Einbau des dichroischen Spiegels ins konfokale Mikroskop konnte die Fluoreszenz von Silizium-Farbzentren detektiert werden. Zunächst wurde dabei die Säulenprobe aus Kassel verwendet. Eine Aufnahme eines Arrays aus Säulen ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Das aufgenommene Array zeigt dabei eine Besonderheit: eine der Säulen ist nicht detektierbar, weil sie keine Farbzentren aufweist oder nicht vorhanden ist. Dies macht es einfacher, eine bestimmte Säule zu identifizieren, auch wenn bei niedrigeren Temperaturen nicht mehr das gesamte Array aufgenommen werden kann.

Das Mikroskop wurde in dieser Messreihe auf die Säule direkt rechts neben der Lücke fokussiert und dann mittels flüssigem Stickstoff (LN) auf ca. 100K abgekühlt. Die gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Für Zeiten zwischen den Messpunkten wurden diese linear interpoliert.

Um zu messen, wie weit sich das konfokale Mikroskop beim Kühlen verzieht, wurde die Position der fokussierten Säule verfolgt. Die Software qudi bietet hierzu die

4. Messungen und Ergebnisse

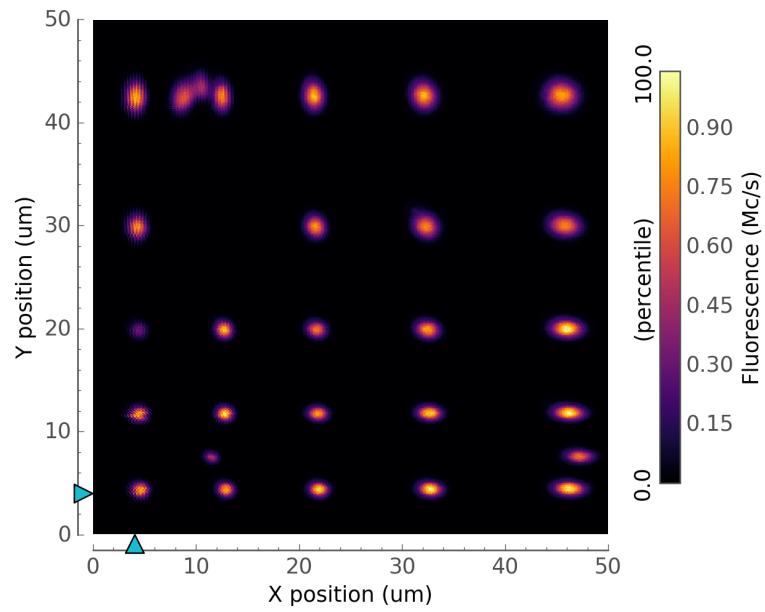


Abbildung 4.8.: Aufnahme der Fluoreszenz von Diamant-Nanolars mit SiV-Zentren.
Jede Säule hat einen Durchmesser von ca. 1 μm

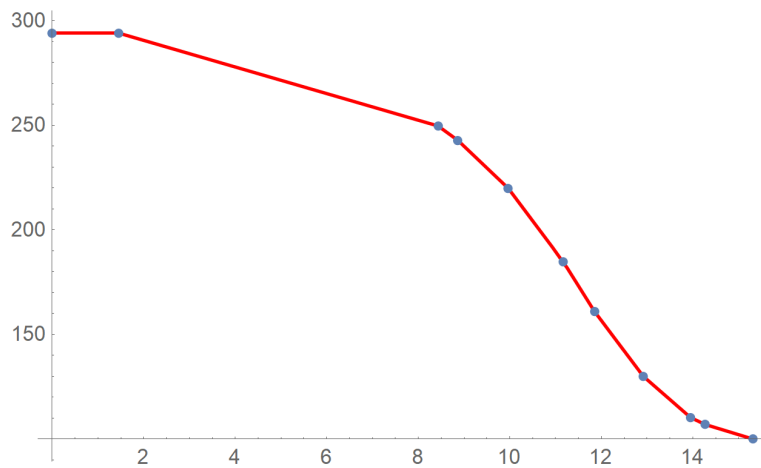


Abbildung 4.9.: Temperatur während der Messungen an SiV-Zentren.

4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)

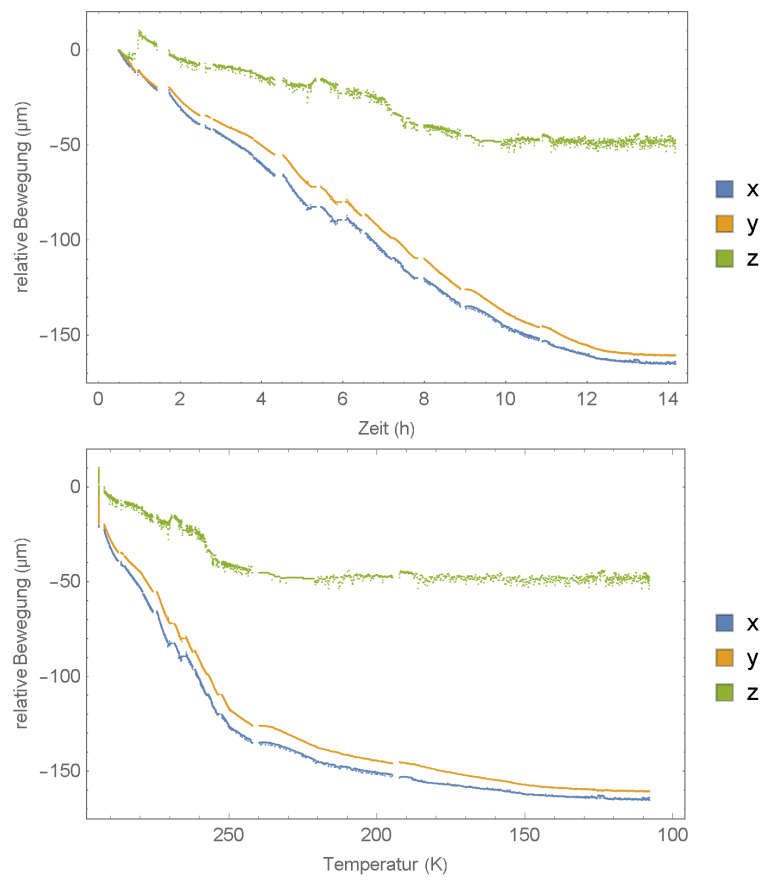


Abbildung 4.10.: Verschiebung der gemessenen Position der Probe während des Kühlens. Bei dem größeren Sprung nach ca. 1h in z-Richtung handelt es sich um einen Bedienfehler und keine echte Bewegung.

4. Messungen und Ergebnisse

Möglichkeit, einen interessanten Punkt (point of interest, POI) zu definieren und zu verfolgen. Die verfolgte Säule bewegte sich dabei in Richtung der linken unteren Ecke des Scanbereichs. Bevor sie nicht mehr zu sehen war, wurde die Verfolgung gestoppt, die Säule über die Stepper wieder zurück in die Mitte bzw. rechte obere Ecke des Scanbereichs gefahren und die Verfolgung mit einem neuen POI wieder aufgenommen.

Die Verschiebung der gemessenen Säulenposition wurde in Abbildung 4.10 dargestellt. Zu erwähnen ist zunächst, dass der erste größere Sprung nach ca. 1h in z-Richtung kein tatsächlicher Sprung ist, hier wurde lediglich beim Nachjustieren kein neuer POI definiert so dass die Säule scheinbar gesprungen ist. Davon abgesehen sieht man, wie sich die gemessene Säulenposition gleichmäßig in negativer x- und y-Richtung bewegt und so insgesamt $164\ \mu\text{m}$ in x-, $161\ \mu\text{m}$ in y- und ca. $60\ \mu\text{m}$ ($47,5\ \mu\text{m}$ zzgl. ca. $12\ \mu\text{m}$ durch den scheinbaren Sprung) in z-Richtung zurücklegt. Die Tatsache, dass sich x- und y-Achse mit gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegen spricht dafür, dass es sich um einen Effekt der Piezo-Stapel handelt. Dabei könnte der Effekt sowohl auf die Piezo-Stepper als auch auf den Scanner zurückzuführen sein. Bei einem Effekt durch den Kupferblock auf dem das Mikroskop montiert ist würde man aufgrund der Symmetrie unterschiedliche Effekte in x- und y-Richtung erwarten. Die Bewegung erfolgt jedoch nahezu linear in der Zeit, obwohl die Kühlgeschwindigkeit verändert wurde (vgl. Abbildung 4.9). Dies spricht dafür, dass der Effekt nicht ausschließlich temperaturabhängig ist.

Parallel zur präziseren Aufnahme durch die Software wurden auch die Positionen der Piezo-Stepper notiert. In Abbildung 4.11 wurden dabei die Position der Einkoppellinse (oben) und der Probe (unten) aufgetragen. Bei der Probe ist die gleiche Tendenz wie schon bei der präziseren Messung durch die Software erkennbar. Bei der Einkoppellinse scheint sich die y-Achse mit $142\ \mu\text{m}$ deutlich stärker verzogen zu haben als die x- ($49\ \mu\text{m}$) und z-Achse ($19\ \mu\text{m}$). Allerdings zeigen die Stepper generell eine deutliche Hysterese und lassen sich kaum präzise auf eine zuvor bekannte Position fahren. Die Aussagekraft dieser Messungen ist also gering.

Neben der Position wurde bei jedem Nachjustieren auch die maximale Intensität notiert, auf die sich die Säule mittels Position und Einkopplung einstellen ließ. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.12 gemeinsam mit der Temperatur dargestellt. Zu erkennen ist, wie die Intensität von anfänglich $875.000\ \text{Photonen/Sekunde}$ bei Raumtemperatur auf $22.000\ \text{Photonen/Sekunde}$ bei $100\ \text{K}$ abfällt. Nach dem Experiment wurde das Mikroskop wieder auf Raumtemperatur aufgewärmt und die maximale Intensität - alleine durch Bewegen der Probe und der Einkoppellinse - erneut gemessen. Hierbei wurden $40.000\ \text{Photonen/Sekunde}$ erreicht. Die Messung zeigt, dass der Effekt nur zu einem kleinen Teil durch die geringere Fluoreszenz der Farbzentren bei niedrigeren Temperaturen erklärt werden kann. Die wahrscheinlichste Erklärung dafür ist, dass sich das konfokale Mikroskop durch das Kühlen auf eine Weise verzieht, die nicht mit den von außen steuerbaren Freiheitsgraden nachjustiert werden kann. Eine Ursache könnten die Spiegelhalter sein, die sich bei der Justage als instabil und schwierig einzustellen erwiesen haben.

4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)

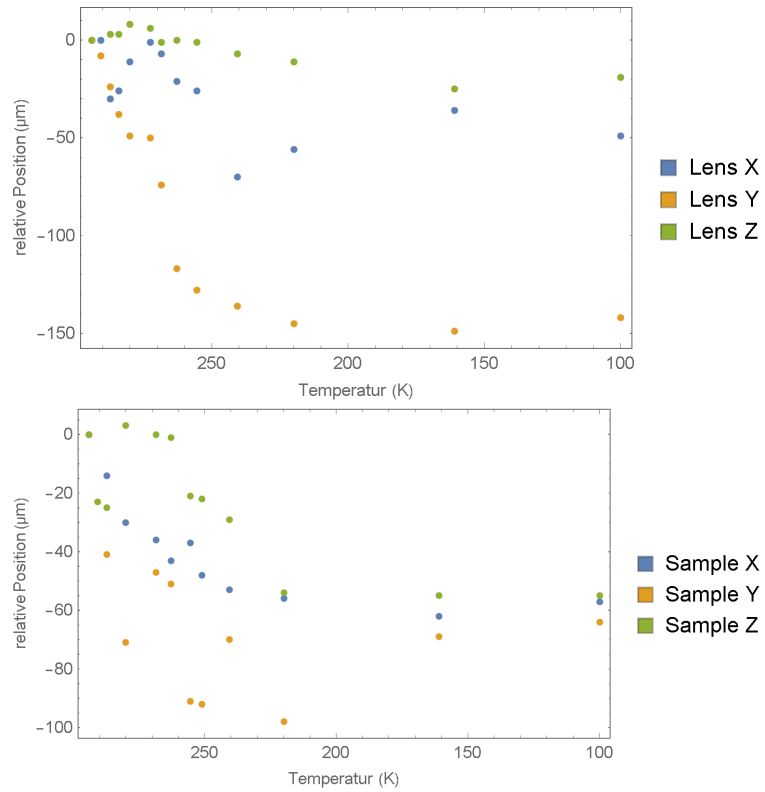


Abbildung 4.11.: Positionen der Stepper während des Kühlens. Oben: Einkoppellinse, Unten: Probe.

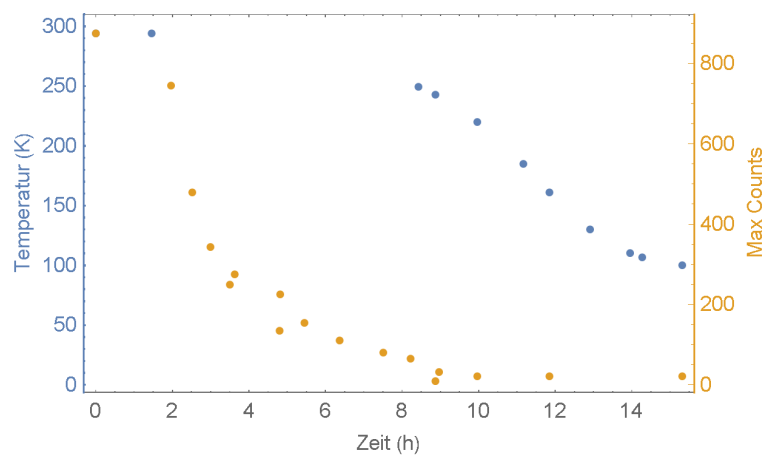


Abbildung 4.12.: Intensität der Fluoreszenz (in 1000 Counts/sec) und Temperatur im Vergleich.

4. Messungen und Ergebnisse

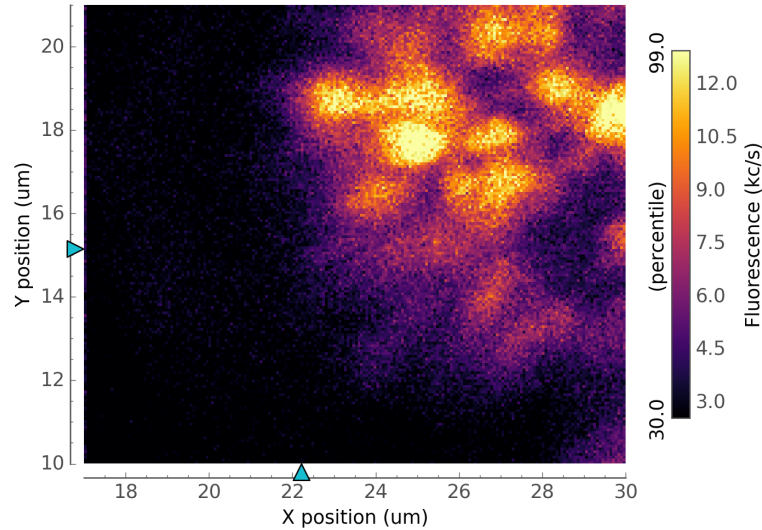


Abbildung 4.13.: Aufnahme der Fluoreszenz von einzelnen SiV-Zentren.

4.3.2. Nachweis der Detektierbarkeit einzelner Farbzentren.

Die bisherigen Messungen wurden allesamt an Ensembles von Farbzentren durchgeführt. Ziel des Experiments ist es jedoch, einzelne Farbzentren zu vermessen. Um nachzuweisen, dass das Mikroskop in der Lage ist, einzelne Farbzentren aufzulösen, wurde nach der Justage auf die Nanosäulen die SIL-Probe vermessen. Die erhaltene Aufnahme ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Eine ähnliches Bild der gleichen Probe unter der gleichen SIL konnte bereits zuvor mit Hilfe von Till Lenz aus der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Budker aufgenommen werden. Das dortige Mikroskop ist für die Arbeit mit NV-Zentren optimiert, konnte aber mit geringer Nachjustage auch für die Aufnahme von SiV-Zentren genutzt werden. Darüber hinaus ist das konfokale Mikroskop der AG Budker in der Lage, die Autokorrelationsfunktion der Photonen darzustellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.14 zu sehen. Der Einbruch der Autokorrelationsfunktion auf $< 65\%$ spricht dafür, dass die Fluoreszenz von einem oder zwei Farbzentren stammt. Da beide Mikroskope sehr ähnliche Aufnahmen unter der gleichen SIL zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass unser konfokales Mikroskop in der Lage ist, die Fluoreszenz einzelner Farbzentren zu detektieren und geeignete Kandidaten für die weiteren Experiment zu finden. Der endgültige Nachweis kann allerdings erst erbracht werden, wenn ein Strahlteiler und eine zweite APD verbaut wurden.

4.3. Silizium-Farbzentren (SiV)

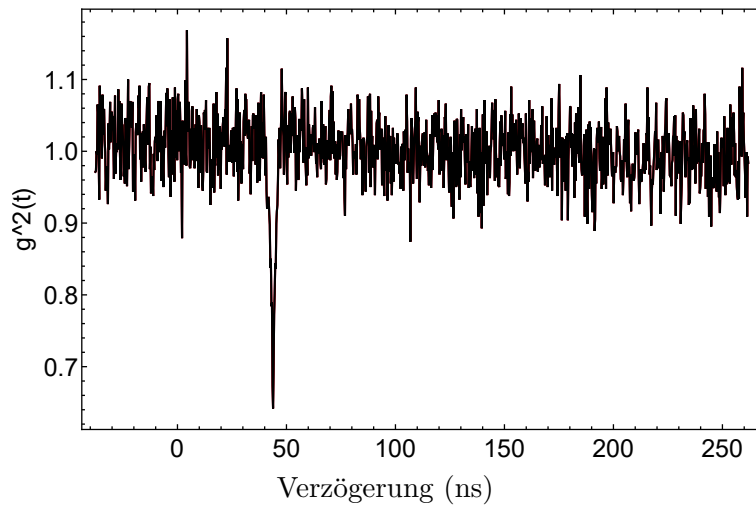


Abbildung 4.14.: Autokorrelationsfunktion der Fluoreszenz.

5. Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit konnte das konfokale Mikroskop und die zum Betrieb benötigten Kabel und Fasern am experimentellen Insert des Kryostaten angebracht werden. Mithilfe der Software „qudi“ konnte das konfokale Mikroskop erfolgreich angesteuert und erste Bilder aufgenommen werden.

Mit der Aufnahme von Spektren von NV-Zentren bei Temperaturen bis 12 K konnte die Funktion des Mikroskops erfolgreich bei kryogenen Temperaturen überprüft werden. Danach wurde die Detektion der Fluoreszenz von SiV-Zentren mithilfe der Pforten-Probe nachgewiesen. In einer Messreihe bei Temperaturen bis 100 K konnte quantifiziert werden, wie weit sich das Mikroskop während des Kühlvorgangs verzieht. Dabei wurden Hinweise darauf gesammelt, wo die Hauptursachen dieser Instabilität liegen. Zuguterletzt wurde gezeigt, dass das Mikroskop in der Lage ist, einzelne SiV-Zentren zu detektieren und aufzulösen.

Über diese Messungen hinaus konnten Techniken für die Bedienung des Kryostaten und die Justage des konfokalen Mikroskops entwickelt und für die weitere Verwendung im Labor dokumentiert werden.

Damit wurde der Weg für weitere Messungen geebnet. Insbesondere sollten in einem ersten Schritt Silizium-Farbzentren auf die Temperatur von flüssigem Helium (LHe) oder mittels Entmischer-Mechanismus in den Bereich von Millikelvin gekühlt werden. Damit kann die Funktion des konfokalen Mikroskops und die Detektion von Farbzentren bei den geplanten Temperaturen nachgewiesen werden. Darüber hinaus können beim Kühlen erneut die scheinbare Bewegung der Probe vermessen werden, um so weitere Hinweise auf die Ursache zu erhalten. Da die Nachjustage des Mikroskops mittels Probe und Einkoppellinse zur Zeit häufig durchgeführt werden muss - insbesondere bei jedem Probenwechsel und immer wiederkehrend während des Kühlens - wäre hier ein automatisierter Mechanismus hilfreich. Konkret benötigt dies einen Algorithmus, der in der Lage ist, in sinnvoller Zeit das Maximum der Fluoreszenz zu finden. In einem weiteren Schritt soll die Detektion von einer auf zwei APDs ausgebaut werden, um so die Messung der Autokorrelationsfunktion zu ermöglichen. Darüber hinaus sollte die Ursache für den nicht-reversiblen Intensitätsverlust gefunden und behoben werden. In früheren Versuchen haben sich teilweise Spiegel in den Spiegelhaltern gelockert und so den Strahlengang stärker beeinflusst als die Einkoppellinse ausgleichen konnte. Da die Spiegelhalter teilweise aufgrund eines Konstruktionsfehlers nicht mit zwei Schrauben gekontert werden können, liegt die Vermutung nahe dass diese sich zu stark verziehen. Auch die Stabilität des Lasers soll verbessert werden, indem die Stabilisierung nach dem Pound-Drever-Hall Verfahren vervollständigt wird. Ein EOM zur Modula-

5. Ausblick

tion der Wellenlänge und der damit verbundenen Erzeugung von Seitenbändern liegt bereit und soll in den Aufbau integriert werden.

Sobald das Experiment zuverlässig und mit ausreichender Signalstärke auch bei einzelnen Farbzentren und kryogenen Temperaturen arbeitet, kann das Absorptions- und Emissionsspektrum der SiV-Zentren vermessen und die Aufspaltung in mehrere Linien beobachtet werden ([Neu+13; Rog+14a]). Über die Anregung eines Lambda-schemas kann dann die Kohärenzzeit bei verschiedenen Temperaturen und möglichst auch bei verschiedenen Magnetfeldern bestimmt werden ([Jah15])

Das Experiment bietet jedoch weitergehendere Möglichkeiten. So ist aktuell geplant, eine Möglichkeit zu schaffen, um Silizium-Farbzentren in einem optischen Resonator aus einem Faserende und einem Spiegel (sog. Faser-cavity) zu beobachten. Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Reithmaier in Kassel arbeitet u.a. daran, optische Resonatoren direkt in der Diamantprobe zu erzeugen, so dass die Probe irgendwann fasergekoppelt arbeiten kann. Dies sollte die Ergebnisse deutlich verbessern, da keine Justage mehr notwendig ist. Auf diese Art und Weise soll das Experiment auf lange Sicht demonstrieren, wie ein Quantenrepeater arbeiten könnte.

A. Anhang

A.1. Justage des konfokalen Mikroskops

Zur Justage des konfokalen Mikroskops kann man wie folgt vorgehen. Dabei unbedingt an Lasersicherheit denken, d.h. Schutz/Justage-Brillen nutzen, Leistung niedrig halten, Laborkollegen informieren und Strahlen wirklich „an die Wand“ und nicht „an unkontrolliert reflektierende Oberflächen“ werfen.

- Grünen Laser durch Anregungsfaser ins Mikroskop leiten (minimale Leistung, gerade sichtbar reicht).
- Strahl aus dem Mikroskop auf eine Laborwand lenken. Wenn der dichroische Spiegel montiert ist, geht das gut indem ein Silberspiegel schräg über dem Objektiv platziert wird.
- Faser so festschrauben, dass der Strahl kollimiert ist.
- Prüfen ob der erste Spiegel relativ mittig getroffen wird.
- Ersten Spiegel so ausrichten, dass der beamsampler/dichroische Spiegel mittig getroffen wird.
- Beam-sampler/dichroischen Spiegel so ausrichten, dass das Objektiv mittig getroffen wird.
- Spiegel auf das Objektiv oder unter das Objektiv auf den Nanopositionierestapel legen und so den Anregungsstrahl in sich selbst zurückwerfen.
- Mit einer Lochblende überprüfen, dass der Strahl möglichst in sich selbst zurückgeworfen wird. Am besten direkt unter der Auskoppellinse. Darauf achten, den richtigen Reflex zu überprüfen (durch die Doppelreflektion an beamsampler/dichroischem Spiegel sind bis zu 4 Reflexe zu sehen). Ggf. Strahlengang anpassen, so dass sowohl das Objektiv mittig getroffen als auch der Strahl in sich selbst zurückgeworfen wird.
- Roten Laser durch die Emissionsfaser quasi „rückwärts“ ins Mikroskop leiten.
- „Rückwärts“ arbeiten und zunächst den Strahl (grob) kollimieren und auf den letzten Spiegel zentrieren (Linse bewegen). Dann weiter den vorletzten Spiegel und auf das Objektiv zentrieren.
- Beide Strahlen gemeinsam mit einem Spiegel über dem Objektiv aus dem Mikroskop leiten und über eine möglichst weite Strecke auf die Wand werfen (mehrere Spiegel verwenden).

A. Anhang

- Durch Bewegen der Einkoppellinse den roten Strahlengang kollimieren und mit dem grünen überlagern. Darauf achten, dass die Strahlengänge ineinander liegen und sich nicht nur kreuzen (d.h. an zwei möglichst weit auseinanderliegenden Punkten überprüfen, z.B. direkt am Mikroskop und an der Wand). Ggf. den Spiegel im Emissionsstrahlengang anpassen.
- Strahlengang normal zurückbauen (d.h. Emission an Detektion), Probe einbauen. Einen hell fluoreszierenden Punkt auf der Probe suchen und dort mit Probenposition und Position der Einkoppellinse die Fluoreszenz maximieren.

A.2. Betrieb des Kryostaten

Hier sollen kurz die Schritte aufgeführt werden, die nötig sind, um den Kryostaten auf Basistemperatur zu kühlen und wieder aufzuwärmen. Die Informationen hier befinden sich im Benutzerhandbuch von Oxford oder dem „Hitchhiker’s Guide to the Dilution Refrigerator“ von Nathaniel Craig und Ted Lester. Eine deutlich detailliertere Liste speziell für dieses Labor befindet sich im Gruppen-internen Wiki unter „Blog:SilVac/How to: Cool down and heat up“. Dort sind auch die notwendigen Ventilzustände wie in Abbildung A.1 zu sehen aufgeführt. Bei Inbetriebnahme des Kryostaten ist immer die vollständige Liste im Wiki zu Hilfe zu nehmen, gewissenhaft jeder Schritt zu prüfen und ggf. die Liste zu ergänzen.

A.2.1. Vorkühlung

- Äußeres Isolationsvakuum (outer vacuum chamber, OVC) abpumpen auf $< 1 \cdot 10^{-7}$ mBar (mind. über Nacht, besser Wochenende nutzen).
- Flüssigen Stickstoff (LN) ins Hauptreservoir füllen (Achtung: Sauerstoffkonzentration im Labor überwachen!)
- Über Nacht stehen lassen, um Magneten zu kühlen.
- LN mit Druck aus LN-Kanne aus dem Hauptreservoir ins Stickstoff-Schild pumpen, zusätzlichen Stickstoff in Stickstoff-Kühlfallen oder weitere Kannen füllen bis Hauptreservoir leer ist.
- Mit „pump&flush“-Prozedur Reste von LN abpumpen und Hauptreservoir mit Helium-Gas füllen.

A.2.2. Vorbereitung des Inserts

- Öffnungen in den Kühlstufen mit Aluminium-Tape verschließen. Kabel und Fasern befestigen. Darauf achten, dass nichts über den Radius der Grundplatte hinausragt.

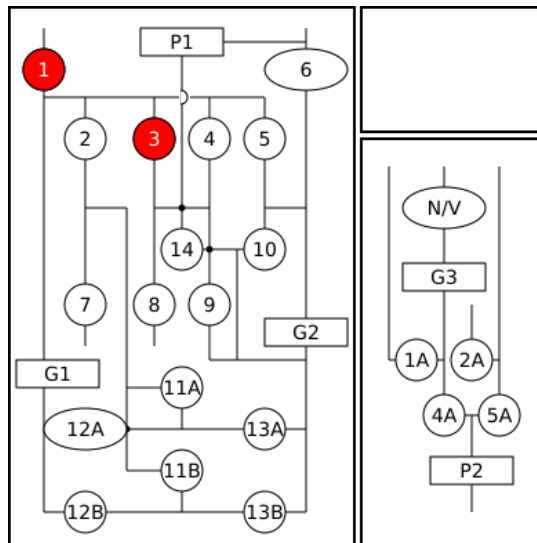


Abbildung A.1.: Schematische Darstellung der Ventile, orientiert an der Darstellung auf der Front der Ventil-Kontroll-Box. Hier mit geöffneten Ventilen #1 und #3.

- Kühlschild montieren. Dabei erneut darauf achten, dass kein Teil des Experiments das Kühlschild berühren kann.
- Leck-Detektor vorbereiten und an das innere Vakuum anschließen. Inneres Vakuumschild mit Indium-Dichtung vorbereiten.
- Absorptionspumpe erwärmen und wieder montieren. Inneres Vakuum schließen und sofort abpumpen. Leck-Test durchführen.
- Inneres Isolationsvakuum (inner vacuum chamber, IVC) auf $< 1 \cdot 10^{-7}$ mBar abpumpen.
- Gemisch-Leitungen im Insert abpumpen.
- „1K-Pot“ mit Heliumgas spülen. Dazu Helium-Ballon an entsprechendem Anschluss anbringen und Nadelventil ca. 15% öffnen. Heliumfluss mit etwas Isopropanol prüfen.
- Etwas Helium als Kontaktgas ins innere Vakuum lassen.
- „sliding seal“ montieren und leicht einfetten.

A.2.3. Montage des Inserts und Kühlen auf 5 K

- Insert langsam in den Kryostaten lassen. Dabei darauf achten, dass immer ein geringer Überdruck von Helium-Gas im Kryostaten herrscht, damit keine Raumluft in den Kryostaten gelangt. Bei montiertem Mikroskop das Insert über Nacht auf

A. Anhang

halber Höhe hängen lassen, um Schäden am Objektiv durch zu schnelles Kühlen zu verhindern.

- Wenn das Insert vollständig im Kryostaten ist und die Umgebungstemperatur von ca. 80-100 K angenommen hat, Gemisch-Leitungen anschließen und auf Lecks testen.
- LHe mit der Transfer-Leitung in den Kryostaten einfüllen. Dabei insbesondere achten auf:
 - Transferleitung kurz mit Helium Gas spülen bevor sie in den Kryostaten eingeführt wird.
 - Transferleitung gut abgepumpt, sie sollte von außen nicht kalt werden.
 - Druck in der Heliumkanne: Möglichst gleichmäßiger Überdruck, gerade genug um den angehängten Ballon leicht aufzublasen. Ständig überwachen!

A.2.4. Kühlen auf 1,5 K

- Gemisch-Leitungen bis zum Insert abpumpen.
- LN-Kühlfalle aufheizen und abpumpen.
- LHe-Kühlfalle aufheizen und abpumpen.
- He⁴-Pumpe starten und am „1 K-Pot“ pumpen. Über Nadelventil den Helium-Fluss regulieren um Temperatur bei ca 1,5 K und Druck vor der Pumpe auf ca. 4-5 mBar zu regulieren.

A.2.5. Kühlen auf Basistemperatur

- Gemisch einkondensieren. Dazu am besten die einprogrammierte Sequenz nutzen. Kann diese nicht genutzt werden, Gemisch langsam über Ventil 12A in den Kryostaten strömen und dort kondensieren lassen. Details finden sich im Wiki.
- Währenddessen ständig Nadelventil nachjustieren, um Temperatur im „1 K-Pot“ zu halten.
- Mischungskreislauf in Gang bringen. Dazu entweder vorgefertigte Sequenz nutzen oder langsam Ventil 6 öffnen. Vorher auf richtige Ventilstellungen achten.

A.2.6. Aufwärmen

- Gemisch zurück in den Aufbewahrungsbehälter strömen lassen. Indem der „1 K-Pot“ wiederholt mit Heliumgas geflutet wird, kann das Gemisch erwärmt und damit verdampft werden. Hierfür steht ebenfalls eine automatisierte Sequenz zur Verfügung.

A.3. Herstellung von Kabelsträngen

- Gemisch zusätzlich aus den Leitungen zurück in den Aufbewahrungsbehälter pumpen.
- Gemischbehälter schließen.
- Mit Kryopumpe wiederholt die gemischführenden Leitungen abpumpen. Dazu jeweils Kryopumpe über Ventile mit Leitungen verbinden, in LHe tauchen, über Ventile mit Gemischfass verbinden und wieder aufwärmen.
- Ist das Gemisch vollständig im Aufbewahrungsbehälter, kann das Insert ganz oder teilweise (an das Objektiv denken!) aus dem Kryostaten gezogen und somit aufgewärmt werden. Der Kryostat selbst bedarf keiner weiteren Behandlung und wird langsam von selbst warm, wenn kein LH oder LHe mehr nachgefüllt wird.
- Beim Herausnehmen des Inserts darauf achten, keine Luft in den Kryostaten oder die Helium-Rückleitung zu ziehen.

A.3. Herstellung von Kabelsträngen

Im Kryostat wurden zusätzliche Drähte verlegt. Diese sind 0.15 mm (NbTi in Kupfermatrix) bzw. 0.22 mm (Kupferdraht) im Durchmesser. Damit die fragilen Drähte nicht einzeln verlegt werden müssen, können sie zu Kabelsträngen zusammengefasst werden.

Dazu kann man wie folgt vorgehen [Bal15]:

- Vier Nägel wie in Abbildung A.2 dargestellt in ein Brett einschlagen.
- Draht an einem der äußeren Nägel befestigen.
- Draht über die beiden mittleren Nägel spannen.
- Draht um den äußeren Nagel auf der anderen Seite legen.
- Draht zurück über die beiden mittleren Nägel spannen.

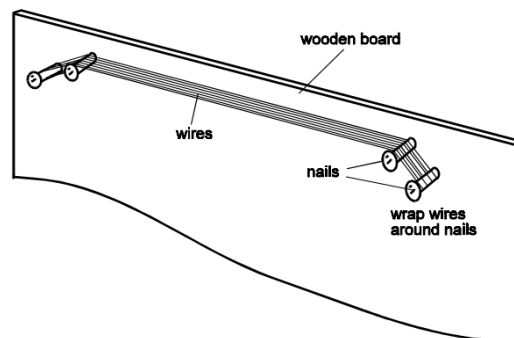


Abbildung A.2.: Skizze zur Herstellung von Kabelsträngen. [Bal15]

A. Anhang

- Darauf achten, dass die Spannung gleich ist und beide Drähte aneinander liegen.
- So oft wiederholen, bis die gewünschte Anzahl an Adern erreicht ist (Tipp: Ersatzadern einplanen), dann Drahtende befestigen.
- Das so entstandene Band an einigen Punkten mit dünnflüssigem Kryo-Lack (GE 7031 Lack) betupfen. Trocknen lassen. Diese Kontaktstellen verhindern beim Bestreichen, dass die Adern sich voneinander lösen.
- In mehreren Lagen die Adern zwischen den mittleren Nägeln mit Lack bestreichen. Dabei mit dünnflüssigerem Lack beginnen, um zunächst einen leichten Halt zwischen den Adern zu erreichen, dann zähflüssiger werden um nicht bereits aneinander haftende Adern zu lösen. Immer wieder gut trocknen lassen.
- Adern an den äußeren Nägeln abschneiden.

Zu beachten ist, dass der Lack zwar einen gewissen Halt zwischen den Adern erzeugt, aber nicht gänzlich verhindert dass Adern sich voneinander lösen. Insbesondere wenn das Kabel geknickt oder in enge Windungen gelegt wird, können sich Adern lösen oder sich das Kabel in zwei Hälften spalten. Auf keinen Fall sollte dann unter Spannung versucht werden, die Hälften wieder zusammenzulackieren - zusätzlicher Lack enthält auch zusätzliches Lösungsmittel, welches unter Spannung eher noch mehr Lack löst.

A.4. Absorptionsspektren der Filter

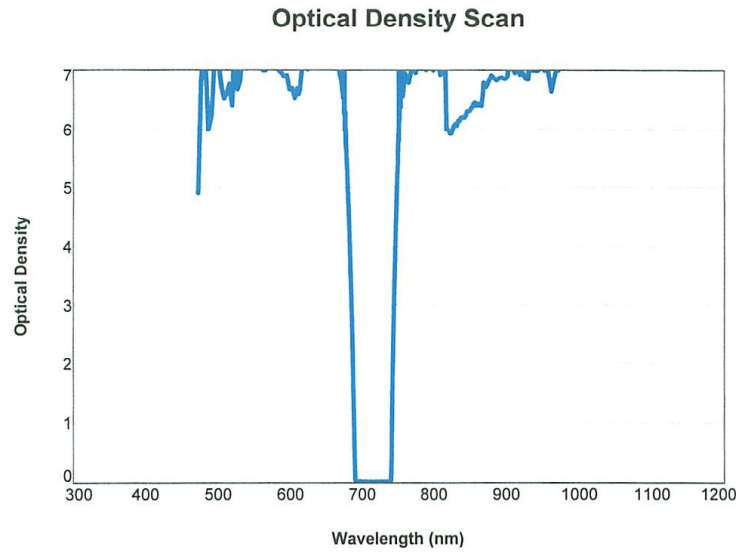


Abbildung A.3.: Optische Dichte des Semrock FF01-716/43.25 Filters.

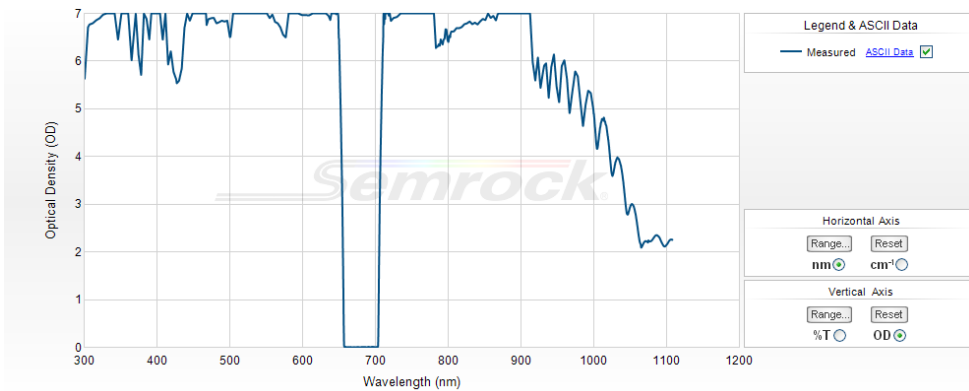


Abbildung A.4.: Optische Dichte des Semrock FF01-680/42-25 Filters.

A. Anhang

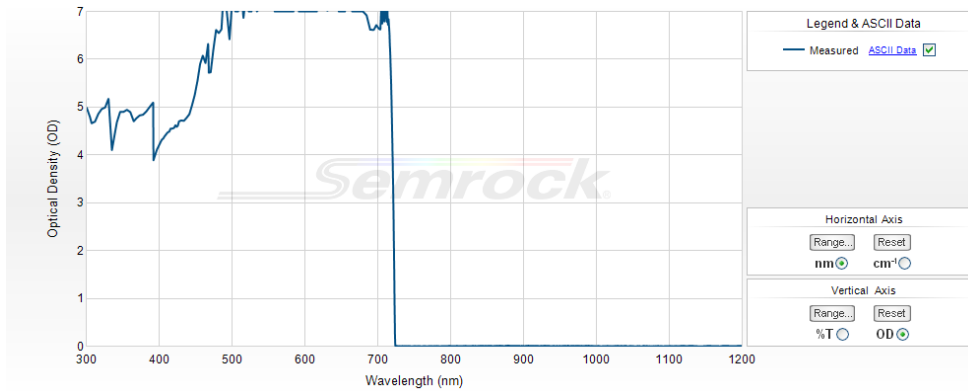


Abbildung A.5.: Optische Dichte des Semrock FF01-715/LP-25 Filters.

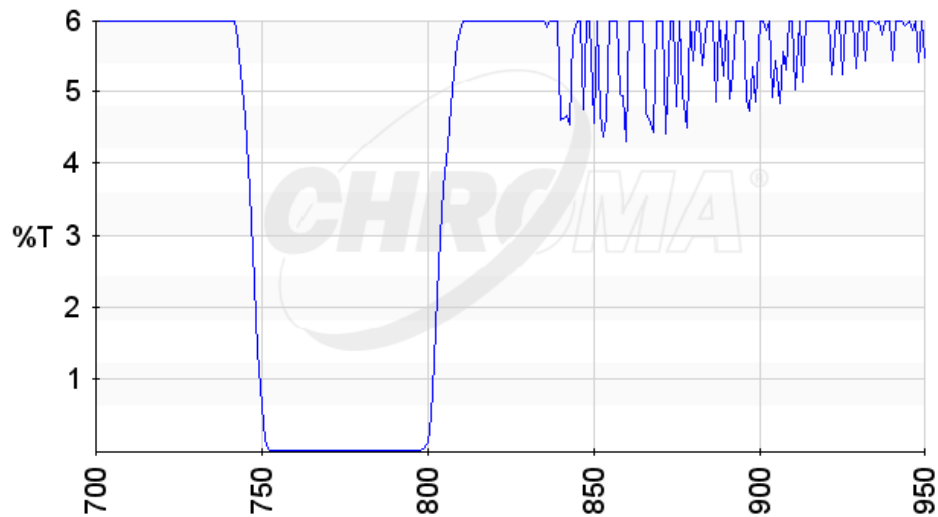


Abbildung A.6.: Optische Dichte des Chroma ET775/50x Filters.

Literatur

- [Aco+10] V. M. Acosta u. a.
„Optical properties of the nitrogen-vacancy singlet levels in diamond“.
In: *Physical Review B* 82.20 (Nov. 2010), S. 201202.
ISSN: 1098-0121.
DOI: 10.1103/PhysRevB.82.201202.
URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.82.201202>.
- [Aha+11] I Aharonovich u. a.
„Diamond-based single-photon emitters“.
In: *Reports on Progress in Physics* 74.7 (Juli 2011), S. 076501.
ISSN: 0034-4885.
DOI: 10.1088/0034-4885/74/7/076501.
URL: <http://stacks.iop.org/0034-4885/74/i=7/a=076501?key=crossref.de26298a109e3a23e095d261d1e2f211>.
- [AML16] Koji Azuma, Akihiro Mizutani und Hoi-Kwong Lo.
„Fundamental rate-loss trade-off for the quantum internet“.
In: *Nature Communications* 7 (Nov. 2016), S. 13523.
URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13523>
<http://10.0.4.14/ncomms13523>
<https://www.nature.com/articles/ncomms13523>
%7B%5C#%7Dsupplementary-information.
- [Bal15] N. H. Balshaw.
Practical Cryogenics.
Oxford Instruments, 2015.
- [Bat] G. Batey, G. Teleberg.
Principles of dilution refrigeration.
Oxford Instruments.
- [Cha+17] Georgios Chatzidrosos u. a.
„Miniature Cavity-Enhanced Diamond Magnetometer“.
In: *Physical Review Applied* 8.4 (Okt. 2017), S. 044019.
ISSN: 2331-7019.
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.044019.
URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.8.044019>.
- [CS04] Guy Cox und Colin J.R. Sheppard.
„Practical limits of resolution in confocal and non-linear microscopy“.

LITERATUR

- In: *Microscopy Research and Technique* 63.1 (Jan. 2004), S. 18–22.
ISSN: 1059-910X.
DOI: 10.1002/jemt.10423.
URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/jemt.10423>.
- [CTJ83] A T Collins, M F Thomaz und M I B Jorge.
„Luminescence decay time of the 1.945 eV centre in type Ib diamond“.
In: *Journal of Physics C: Solid State Physics* 16.11 (Apr. 1983), S. 2177–2181.
ISSN: 0022-3719.
DOI: 10.1088/0022-3719/16/11/020.
URL: <http://stacks.iop.org/0022-3719/16/i=11/a=020?key=crossref.e53541c5b1fb9e60387d4bdc3eaa68a1>.
- [Def06] Default007.
Wikimedia.
2006.
URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Convolution%7B%5C_%7DIllustrated%7B%5C_%7Deng.png (besucht am 03.01.2018).
- [Doh+11] M W Doherty u. a.
„The negatively charged nitrogen-vacancy centre in diamond: the electronic solution“.
In: *New Journal of Physics* 13.2 (Feb. 2011), S. 025019.
ISSN: 1367-2630.
DOI: 10.1088/1367-2630/13/2/025019.
URL: <http://stacks.iop.org/1367-2630/13/i=2/a=025019?key=crossref.9dc849f93a4bc63bf89c15afa6abaf62>.
- [Doh+13] Marcus W. Doherty u. a.
„The nitrogen-vacancy colour centre in diamond“.
In: *Physics Reports* 528.1 (Juli 2013), S. 1–45.
ISSN: 03701573.
DOI: 10.1016/j.physrep.2013.02.001.
arXiv: 1302.3288.
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157313000562>.
- [Fel+16] Nina Felgen u. a.
„Incorporation and study of SiV centers in diamond nanopillars“.
In: *Diamond and Related Materials* 64 (Apr. 2016), S. 64–69.
ISSN: 09259635.
DOI: 10.1016/j.diamond.2016.01.011.
URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925963516300115>.
- [Gru+97] A Gruber u. a.

- „Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers“.
 In: *Science* 276.5321 (Juni 1997), 2012 LP –2014.
 URL: <http://science.sciencemag.org/content/276/5321/2012.abstract>.
- [Hep+13] Christian Hepp u. a.
 „The electronic structure of the silicon vacancy color center in diamond“.
 In: *Physical Review Letters* (Okt. 2013).
 ISSN: 00319007.
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.036405.
 arXiv: 1310.3106.
 URL: <http://arxiv.org/abs/1310.3106><http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.036405>.
- [Her17] Yanik Stefan Herrmann.
 „Frequenzstabilisierung eines Lasers bei 737 nm für Messungen an Silizium-Farbzentren“.
 Bachelorarbeit. Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 2017.
- [Jah+15] Kay D. Jahnke u. a.
 „Electron–phonon processes of the silicon-vacancy centre in diamond“.
 In: *New Journal of Physics* 17.4 (Apr. 2015), S. 043011.
 ISSN: 1367-2630.
 DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/043011.
 arXiv: 1411.2871.
 URL: <http://stacks.iop.org/1367-2630/17/i=4/a=043011?key=crossref.e56c6d0877a8fe4bf8d2fd97d8d0a61b>.
- [Jah15] Kay Daniel Jahnke.
 „Low temperature spectroscopy of single colour centres in diamond“.
 PhD Thesis. Universität Ulm, 2015.
- [Luo+16] D Luong u. a.
 „Overcoming lossy channel bounds using a single quantum repeater node“.
 In: *Applied Physics B* 122.4 (Apr. 2016), S. 96.
 ISSN: 1432-0649.
 DOI: 10.1007/s00340-016-6373-4.
 URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-016-6373-4>.
- [Mit96] Yoshimi Mita.
 „Change of absorption spectra in type-I b diamond with heavy neutron irradiation“.
 In: *Physical Review B* 53.17 (Mai 1996), S. 11360–11364.
 ISSN: 0163-1829.
 DOI: 10.1103/PhysRevB.53.11360.
 URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.53.11360>.

LITERATUR

- [Neu+13] Elke Neu u. a.
„Low-temperature investigations of single silicon vacancy colour centres in diamond“.
In: *New Journal of Physics* 15.4 (Apr. 2013), S. 043005.
ISSN: 13672630.
DOI: 10.1088/1367-2630/15/4/043005.
arXiv: 1210.3201.
URL: <http://stacks.iop.org/1367-2630/15/i=4/a=043005?key=crossref.977843554f6710e258684cffe86f4b10>.
- [Pin+14] Benjamin Pingault u. a.
„All-Optical Formation of Coherent Dark States of Silicon-Vacancy Spins in Diamond“.
In: *Physical Review Letters* 113.26 (Dez. 2014), S. 263601.
ISSN: 0031-9007.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.263601.
arXiv: 1409.4069.
URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.263601>.
- [Pir+17] Stefano Pirandola u. a.
„Fundamental limits of repeaterless quantum communications“.
In: *Nature Communications* 8 (Apr. 2017), S. 15043.
URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms15043> <http://10.0.4.14/ncomms15043> <https://www.nature.com/articles/ncomms15043?7B%5C#%7Dsupplementary-information>.
- [Rie+17] Daniel Riedel u. a.
„Deterministic Enhancement of Coherent Photon Generation from a Nitrogen-Vacancy Center in Ultrapure Diamond“.
In: *Physical Review X* 7.3 (Sep. 2017), S. 031040.
ISSN: 2160-3308.
DOI: 10.1103/PhysRevX.7.031040.
arXiv: 1703.00815.
URL: <http://arxiv.org/abs/1703.00815> <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevX.7.031040> <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.7.031040>.
- [Rog+14a] L.J. Rogers u. a.
„Multiple intrinsically identical single-photon emitters in the solid state“.
In: *Nature Communications* 5 (Aug. 2014), S. 4739.
ISSN: 2041-1723.
DOI: 10.1038/ncomms5739.
arXiv: [arXiv:1310.3804v2](https://arxiv.org/abs/1310.3804v2).
URL: <http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms5739>.
- [Rog+14b] Lachlan J. Rogers u. a.

- „All-Optical Initialization, Readout, and Coherent Preparation of Single Silicon-Vacancy Spins in Diamond“.
 In: *Physical Review Letters* 113.26 (Dez. 2014), S. 263602.
 ISSN: 0031-9007.
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.263602.
 arXiv: 1410.1355v1.
 URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.263602>.
- [SS97] C.J.R. Sheppard und D.M. Shotton.
Confocal laser scanning microscopy.
 Bd. 38.
 Oxford, UK: BIOS Scientific Publishers Limited, 1997.
 ISBN: 1-872748-72-4.
- [Suk+17] Denis D. Sukachev u. a.
 „The silicon-vacancy spin qubit in diamond: quantum memory exceeding ten milliseconds and single-shot state readout“.
 In: (Aug. 2017).
 arXiv: 1708.08852.
 URL: <https://arxiv.org/abs/1708.08852>
- [TGW14] Masahiro Takeoka, Saikat Guha und Mark M Wilde.
 „Fundamental rate-loss tradeoff for optical quantum key distribution“.
 In: *Nature Communications* 5 (Okt. 2014), S. 5235.
 URL: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms6235><http://10.0.4.14/ncomms6235><https://www.nature.com/articles/ncomms6235>
 7B%5C#%7Dsupplementary-information.
- [Ver14] Johannes Verst.
 „Aufbau eines Messplatzes zur optischen Detektion magnetischer Resonanz und Manipulation von NV-Zentren“.
 Diplomarbeit. Johannes-Gutenberg Universität Mainz, 2014.
- [Wic+16] Arne Wickenbrock u. a.
 „Microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond“.
 In: *Applied Physics Letters* 109.5 (Aug. 2016), S. 053505.
 ISSN: 0003-6951.
 DOI: 10.1063/1.4960171.
 URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4960171>.