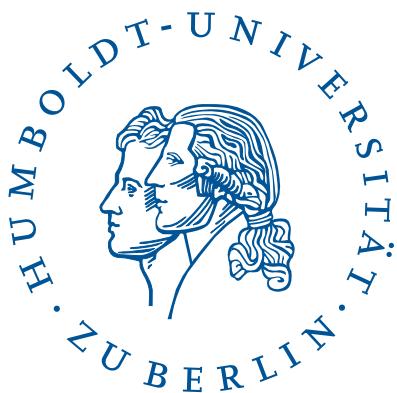


Stabilisierung eines Aufbaus zur Untersuchung von
Quantenpunkten

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science
(B. Sc.)
im Fach Physik



eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I
Institut für Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

von
Moritz Stange
geboren am 02.03.1991 in Hamburg

Gutachter:

1. Prof. Dr. Oliver Benson
2. Prof. Achim Peters, Ph.D.

eingereicht am:

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielstellung	2
2 Physikalischer Hintergrund	5
2.1 Eigenschaften einzelner Photonen	5
2.1.1 Photoelektrischer Effekt	5
2.1.2 Quantisierung des Elektromagnetischen Feldes	5
2.1.3 Fock-Zustände, Kohärente Zustände und Photonenstatistik . .	6
2.2 Halbleiterquantenpunkte als Einzelphotonenquelle	7
3 Experimentelle Grundlagen	10
3.1 Versuchsaufbau	10
3.1.1 Konfokales Mikroskop	11
3.1.2 Monochromator	11
3.1.3 Lawinen-Photodioden	12
3.2 Probenstruktur	13
3.3 Grundlagen des Programms <i>QDSearch</i>	14
4 Stabilisierung	16
4.1 Notwendigkeit der Stabilisierung	16
4.2 g^2 -Messung zur Charakterisierung von Quantenpunkten	16
4.3 Beschreibung der Autofokussierung	17
4.3.1 Ansätze zur Realisierung der Autofokussierung	17
4.3.2 Algorithmus für die Piezo-Steuerung (z -Autofokussierung)	17
4.3.3 Algorithmus für den Kryostat-Schrittmotor (x - y -Autofokussierung)	18
4.4 Restrukturierung des Programms	22
4.4.1 Kommunikation unter den Klassen	22
4.4.2 Shiftspeeds, Readmode, Acquisitionmode	23
4.4.3 Berechnung und Markierung von Zielfrequenzen	25
4.5 Performance	27
5 Zusammenfassung	29

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung einer Übertragung einer Verschränkung	4
2.1	Autokorrelationsfunktionen zweiter Ordnung von verschiedenen Lichtquellen	7
2.2	Bandschema eines InAs Quantenpunktes auf GaAs.	9
3.1	Schematischer Versuchsaufbau	10
3.2	Konfokales Mikroskop	12
3.3	Czerny-Turner-Aufbau eines Monochromators	12
3.4	Bänder-Modell einer APD (Vgl. Abb. 9.8 in [11])	13
3.5	Probenstruktur	14
3.6	<i>Graphical User Interface</i> für das Spektrometer	15
4.1	Grafische Darstellung des Suchalgorithmus in z -Richtung	19
4.2	Algorithmus für die Maximierung in der x - y -Ebene	21
4.3	Bilder der <i>Andor SDK</i> im FVB und Imagemode	23
4.4	Frequenzmarkierung für die Suche nach Quantenpunkten	26
4.5	Kalibrierungsmöglichkeit der Kamera	26
4.6	Wasserfall-Diagramm der x - y -Autofokussierung	28

Kapitel 1

Einleitung und Zielstellung

Die Kryptographie ist eine Jahrhunderte alte Wissenschaft, deren Ziel es ist Informationen zu verschlüsseln und zu entschlüsseln. Bei einer Übertragung von Daten zwischen zwei Parteien soll gewährleistet sein, dass die Authentizität, Vertraulichkeit und Integrität garantiert ist. Verschlüsselungen können in asymmetrischer und symmetrischer Verschlüsselung unterschieden werden. Bei asymmetrischer Verschlüsselung generiert der Empfänger einer Nachricht zwei Schlüssel. Einer davon ist geheim und bleibt bei ihm. Der andere ist öffentlich. Jeder, der dem Empfänger Informationen verschlüsselt zukommen lassen will, kann diese über den öffentlichen Schlüssel verschlüsseln. Nur mit dem geheimen Schlüssel des Empfängers sind diese entschlüsselbar. Ein Vorteil bei dieser Art von Verschlüsselung ist, dass kein Austausch von geheimen Schlüsseln erfolgen muss, der das Verfahren kompromittieren könnte. Dennoch ist die Authentizität hier schlecht zu überprüfen, da es einfach ist öffentliche Schlüssel in Umlauf zu bringen, die nicht zum Empfänger gehören.

Im Gegensatz dazu verwendet die symmetrische Verschlüsselung nur einen Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln einer Nachricht. Sie ist bei gleicher Schlüssellänge sicherer als die asymmetrische Verschlüsselung [9]. Problematisch ist hier, dass sichergestellt werden muss, dass der Schlüssel nur den beiden Parteien bekannt ist, da sonst auf die Vertraulichkeit und Integrität der übermittelten Informationen kein Verlass sein kann. Ein Lauschangreifer zwischen Sender und Empfänger kann mit Schlüsselkenntnis die Nachricht unbemerkt entschlüsseln, verändern und weiter senden.

Die meisten Verschlüsselungsalgorithmen beruhen heutzutage auf der Annahme, dass es keinen zeit-effizienten Algorithmus gibt, der eine Primfaktorzerlegung von Zahlen realisieren kann. Die Sicherheit einer solchen Verschlüsselung hängt direkt von der Rechenstärke einer Partei ab, die nicht im Besitz des Schlüssels ist. Sollte jedoch ein Algorithmus gefunden werden, dessen Zeitaufwand linear mit der Länge des Schlüssels steigt, wäre diese Verschlüsselung ebenfalls nicht mehr verlässlich.

Es existieren jedoch Möglichkeiten Informationen absolut sicher zu verschlüsseln. Benutzt man beispielsweise ein *One-Time-Pad*, also einen Schlüssel, der genauso lang wie die zu übertragende Information ist und nur einmal verwendet wird, kann diese Verschlüsselung ohne das *One-Time-Pad* nicht gelesen werden. Denn ohne Kenntnis des Schlüssels kann jede beliebige Nachricht aus dem Chiffraut erzeugt werden, ohne Garantie, dass dies die ursprüngliche Nachricht war. Der Empfänger und der Sender der Nachricht müssen hierfür allein die Sicherheit haben, dass keine

weitere Partei über das *One-Time-Pad* verfügt. Das Problem der Schlüsselverteilung stellt sich als eine grundlegende Hürde für eine sichere Verschlüsselung.

Im Jahre 1984 wurde ein Protokoll vorgestellt, das die Physik der Quantenmechanik ausnutzt, um eine sichere Schlüsselverteilung zu gewährleisten und unter dem Namen *BB84* bekannt wurde [2]. Während klassische Signale, wie beispielsweise elektronische Pulse zwischen Sender und Empfänger, unbemerkt abgehört werden können, verhält es sich mit quantenmechanischen Zuständen, wie von einzelnen Photonen, anders. Beim *BB84* tragen einzelne Photonen den Wert 0 oder 1 vom Sender zum Empfänger. Der Sender wählt jedoch zufällig zwischen zwei Basen für die Übermittlung. Wird bei einem Lauschangriff die Verbindung abgehört und der Zustand des Photons in einer zufälligen Basis gemessen, fällt dies zwangsläufig als statistische Störung zwischen Sender und Empfänger auf. Ein unbemerktes Abhören ist unmöglich, da das *No-Cloning*-Theorem es verbietet einen unbekannten Quantenzustand zu kopieren [14]. Eine störungsfreie Kommunikation zwischen Sender und Empfänger garantiert die Vertraulichkeit der Verbindung. Sender und Empfänger können so zusammen eine zufällige, aber vertrauliche Bitfolge generieren, die sicher als *One-Time-Pad* genutzt werden kann.

Da die Absorption von Photonen in Glasfaserkabeln exponentieller Art ist ($0,2 \text{ dB/km}$) [4] können unverstärkte Signale keine relevanten Strecken für globale Kommunikation zurücklegen. Für die Distanz zwischen Berlin und München hieße dies, dass bei einem unverstärkten Signal eine Übertragungsrate von 100 Gigabit/s auf 10 Bit/s reduziert werden würde. Von den Daten einer übermittelten DVD (4,7 Gigabyte) kämen, statistisch betrachtet, nur 4 Bit beim Empfänger an. Deshalb werden bei klassischen Lichtsignalen in regelmäßigen Abständen Verstärker eingesetzt, die das Signal über die Strecke erhalten. Dies ist bei Einzelphotonen wegen des *No-Cloning*-Theorems nicht möglich. Eine Möglichkeit dennoch Photonen über längere Wegstrecken auszutauschen, ist in Abbildung 1.1 skizziert. Viele Photonen überbrücken die längere Wegstrecke abschnittsweise und werden in jeweils einer Bell-Zustandsmessung mit den benachbarten Photonen verschränkt, so dass eine Verschränkung der Photonen an den Enden der Übertragungskette stattfindet. Auf diese Weise können Sender und Empfänger auch über eine längere Wegstrecke eine gemeinsame Bitfolge erstellen. Um einen solchen Prozess mit hoher Effizienz durchzuführen werden Einzelphotonenquellen benötigt, die Photonen verlässlich bei einer bestimmten Wellenlänge emittieren.

In der AG Nanooptik an der Humboldt-Universität werden Quantenpunktproben, die Einzelphotonenquellen darstellen, charakterisiert. Es existiert bereits das Programm *QDSearch* [8], welches automatisiert einen Messaufbau (siehe Abbildung 3.1) steuert, um Quantenpunkte zu untersuchen. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Automatisierung so zu stabilisieren, dass Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden können, ohne dass manuell die Justage geregelt werden muss. Dazu wird das Programm um eine Autofokussierung und andere Bestandteile erweitert, die unter anderem automatisierte Messungen ermöglichen sollen.

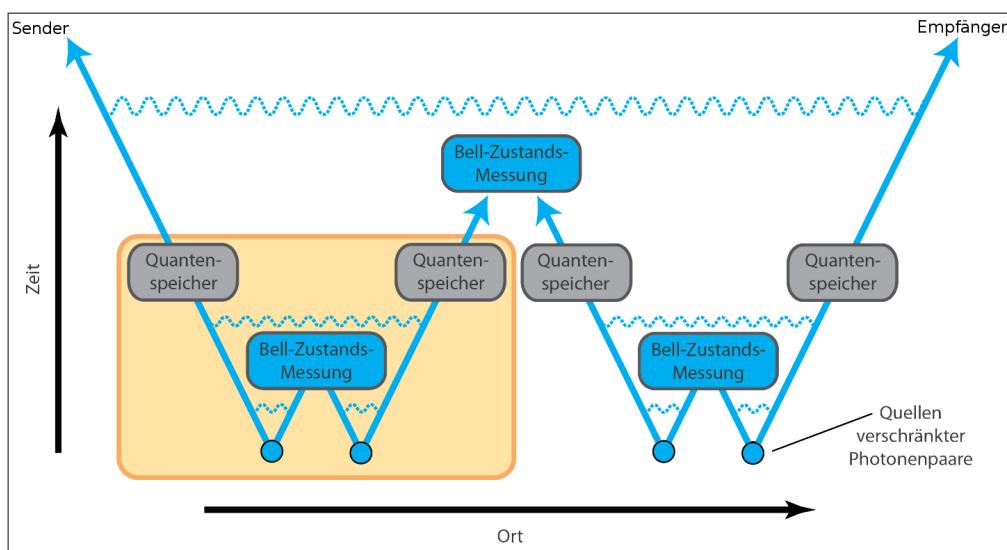


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung einer Übertragung von verschrankten Photonen zwischen Sender und Empfänger. In einem Quantenrepeater (gelb unterlegt) werden Photonen in einer Bell-Zustandsmessung verschrankt und so die Verschränkung über den Ort zwischen Sender und Empfänger aufrecht erhalten. Grafik (modifiziert) entnommen aus [5].

Kapitel 2

Physikalischer Hintergrund

2.1 Eigenschaften einzelner Photonen

2.1.1 Photoelektrischer Effekt

Die historische Annahme, Licht ließe sich vollständig durch eine Theorie beschreiben, die Licht einen Wellencharakter zuweist, hat sich nicht bewährt. Zwar können einige Phänomene, wie Beugung, Brechung, Interferenzmuster und Reflexion von Licht an Grenzflächen durch die Maxwell-Gleichungen und das Huygenssche Prinzip erklärt werden. Der photoelektrische Effekt zeigt jedoch, dass diese Beschreibung nicht ausreichend ist. Im Experiment tritt beim Bestrahlen einer Metalloberfläche mit UV-Strahlung ein Elektronenstrom aus. Es ergeben sich folgende Beobachtungen [15]:

1. Unterhalb einer gewissen Frequenz ν_0 treten beim Bestrahlen keine Elektronen aus der Oberfläche aus.
2. Bei Frequenzen $\nu > \nu_0$ treten Elektronen ohne zeitliche Verzögerung aus.
3. Die Anzahl der austretenden Elektronen ist bei $\nu > \nu_0$ direkt proportional zur eingestrahlten Intensität.
4. Die kinetische Energie der Elektronen hängt linear mit der Frequenz des eingestrahlten Lichtes zusammen.

Die Existenz einer Grenzfrequenz ν_0 und die Beobachtung, dass die Emission der Elektronen quasi instantan erfolgt, führte Einstein 1905 zu seiner Hypothese, dass Licht aus gequantelten Energiepaketen besteht.

2.1.2 Quantisierung des Elektromagnetischen Feldes

Aus den Maxwell-Gleichungen lässt sich unter Einführung der Erzeuger- und Vernichteroperatoren a^\dagger und a folgende Form für das elektrische und das magnetische Feld \vec{E} , \vec{H} herleiten [12]:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{k}} \vec{e}_{\vec{k}} \cdot \epsilon_{\vec{k}} \cdot a_{\vec{k}} \cdot e^{-i(\omega_k t - \vec{k} \cdot \vec{r})} + h.c. \quad (2.1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \sum_{\vec{k}} \frac{\vec{k} \times \vec{e}_{\vec{k}}}{\omega_k} \cdot \epsilon_{\vec{k}} \cdot a_{\vec{k}} \cdot e^{-i(\omega_k t - \vec{k} \cdot \vec{r})} + h.c. \quad (2.2)$$

In diesen Formeln ist \vec{e}_k der Einheitsvektor in Richtung des Wellenvektors jedes Photons. ϵ_k steht für das elektrische Feld jedes der einzelnen Photonen und $h.c.$ für den hermitesch konjugierten Anteil.

2.1.3 Fock-Zustände, Kohärente Zustände und Photonenstatistik

Fock-Zustände $|n\rangle$ sind Eigenzustände zum Nummeroperator $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$, das heißt für $|n\rangle$ gilt:

$$\hat{n} |n\rangle = n |n\rangle \quad (2.3)$$

Hierbei sind \hat{a}^\dagger und \hat{a} die Erzeuger- und Vernichtungsoperatoren aus Abschnitt 2.1.2. Die Wahrscheinlichkeit n Photonen in einem Zustand $|\psi\rangle$ zu finden kann über das Skalarprodukt

$$p_{|\psi\rangle}(n) = |\langle n|\psi\rangle|^2 \quad (2.4)$$

bestimmt werden.

Den Zustand $|\alpha\rangle$, der mit dem Vernichtungsoperator \hat{a} und seinem Eigenwert α die Gleichung

$$\hat{a} |\alpha\rangle = \alpha |\alpha\rangle \quad (2.5)$$

erfüllt, wird kohärenter Zustand genannt.

Die Statistik der Abstrahlung von Photonen ist eine wichtige Charakteristik von Lichtquellen. In Abbildung 2.1 werden verschiedene Arten von Lichtquellen charakterisiert. Die Autokorrelationsfunktionen zweiter Ordnung stehen in Verbindung mit der Intensität (\vec{E}^2), im Gegensatz zur Korrelationsfunktion erster Ordnung, bei der die Amplitude des Feldes betrachtet wird.

Eine klassische thermische Lichtquelle zeigt das Verhalten, dass Photonen zu einem bestimmten Zeitpunkt verstärkt emittiert werden. Eine absolut kohärente Lichtquelle, wie ein Laser, zeigt in der Autokorrelationsfunktion zu jedem Zeitpunkt den Wert Eins. Alle Photonen werden vollkommen unabhängig voneinander ausgesendet. Im Unterschied zu beiden verschwindet die Autokorrelationsfunktion für einen Fock-Zustand $|n=1\rangle$ für $t=0$. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon direkt nach einem anderen emittiert wird ist stark unterdrückt, was der Charakteristik von Einzelphotonenquellen entspricht.

Mit den quantisierten Feldern aus Abschnitt 2.1.2, kann gezeigt werden, dass die normalisierte Korrelationsfunktion 2. Ordnung bei der Zeitdifferenz $\tau = 0$ wie folgt geschrieben werden kann [13]:

$$g^2(\tau = 0) = \frac{\langle a^\dagger a^\dagger a a \rangle}{\langle a^\dagger a \rangle^2} \quad (2.6)$$

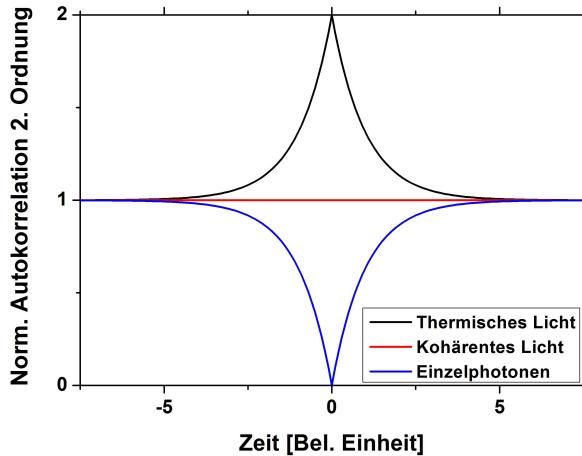


Abbildung 2.1: Autokorrelationsfunktionen zweiter Ordnung von thermischen (schwarz) und kohärenten (rot) Lichtquellen und Einzelphotonen (blau). Entnommen aus [5].

Mit dem eingeführten Zustand $|n\rangle$, dem Nummernoperator \hat{n} und der Vertauschungsrelation $[a, a^\dagger] = 1$ lässt sich für einen Nummernzustand $|n\rangle$ die Formel 2.6 vereinfachen:

$$g^2(0) = \frac{\langle n | a^\dagger (aa^\dagger - 1)a | n \rangle}{\langle n | \hat{n} | n \rangle^2} = \frac{n^2 - n}{n^2} = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.7)$$

Für Fock-Zustände $|n = 1\rangle$ verschwindet die Korrelationsfunktion in Gleichung 2.7. Einzelphotonenquellen sind Systeme, die mit großer Wahrscheinlichkeit nur einzelne Photonen emittieren. Diese Eigenschaft verdeutlicht auch, warum es nicht ausreicht eine Glühbirne oder einen Laser immer weiter abzuschwächen um eine Einzelphotonenquelle zu erhalten [13]. Eine Reduzierung der durchschnittlichen Anzahl emittierter Photonen ändert nicht die Emissionsstatistik der Lichtquellen.

2.2 Halbleiterquantenpunkte als Einzelphotonenquelle

Halbleiterquantenpunkte sind Strukturen in der Größenordnung von einigen Nanometer bis zu einem Mikrometer. Sie können aus verschiedenen Materialien gewachsen werden. Für den infraroten Spektralbereich eignet sich beispielsweise InAs, welches auf GaAs gewachsen wird. Durch die kleinere Bandlücke von InAs im Vergleich zu GaAs entsteht ein Potentialtopf im Bandschema (siehe Abbildung 2.2). Dieser Potentialtopf beschränkt die Elektronen in allen drei Raumdimensionen und führt dazu, dass die Wellenfunktionen der Ladungsträger im Inneren der Quantenpunkte nur noch diskrete Energieniveaus einnehmen können. Hieraus resultieren interessante optische Eigenschaften. Mit einem Laser kann der Quantenpunkt auf verschiedene Arten angeregt werden (siehe Grafik 2.2). Alle Exzitonen relaxieren nicht-strahlend auf das tiefste Energieniveau und emittieren bei Rekombination ein Photon fester Wellenlänge [13]. Die Art der Anregung, resonant, quasi-resonant oder

nicht-resonant, nimmt Einfluss auf das Strahlungsverhalten des Quantenpunktes. Bei nicht-resonanter Anregung führt der Stark-Effekt zu einer Linienverbreiterung im Emissionsspektrum. Auch die thermische Verbreiterung des Potentialtopfs mit daraus veränderter Lage aller Energieniveaus führt zu einer solchen Verbreiterung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass nahe aneinander liegende, benachbarte Potentialtöpfe durch gegenseitige Kopplung ihre Energieniveaus verzerrn.

Ähnlich wie einzelne Atome können einzelne Halbleiterquantenpunkte als Einzelphotonenquellen dienen, da sie diskrete Energieniveaus besitzen und bei der Rekombination des Elektron-Lochpaars ein einzelnes Photon emittieren, wie in Abbildung 2.2 angedeutet. Einzelphotonenquellen haben idealerweise folgende Eigenschaften [13]:

1. **Quanteneffizienz:** Die Emissionswahrscheinlichkeit für Einzelphotonenzustände liegt bei 100% (bzw. die Emissionswahrscheinlichkeit für Mehrphotonenzustände liegt bei 0%).
2. **Emission auf Abruf:** Die Emission kann zu einem definierten Zeitpunkt ausgelöst werden.
3. **Fourier-limitierte Emissionsbreite:** Die Linienbreite $\Delta\omega$ des Emissionspektrums ist nur durch die Lebensdauer des Übergangs bestimmt.
4. **Regulierbarkeit der spektralen Emission:** Die Wellenlänge der Einzelphotonen kann von außen vorgegeben und in einem gewissen spektralen Bereich variiert werden.

Die Kontrolle dieser Eigenschaften der Einzelphotonenquellen ist Gegenstand der aktuellen Forschung [3, 6].

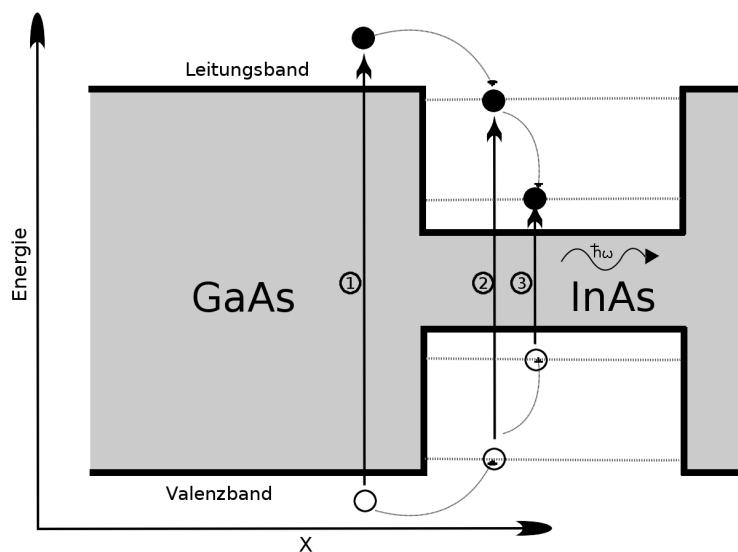


Abbildung 2.2: Bandschema eines InAs Quantenpunktes auf GaAs. Durch die kleinere Bandlücke von InAs ergibt sich ein Potentialtopf in dem durch die Beschränkung nur diskrete Energieniveaus zugelassen sind. Die Anregung kann nicht-resonant (1), quasi-resonant (2) oder resonant (3) erfolgen (Vgl. Abb. 3.6 in [13]).

Kapitel 3

Experimentelle Grundlagen

3.1 Versuchsaufbau

Die Untersuchung von Quantenpunkten findet in einem Mikro-Photolumineszenz-Aufbau statt. Eine Darstellung des genutzten Versuchsaufbaus findet sich in Abbildung 3.1.

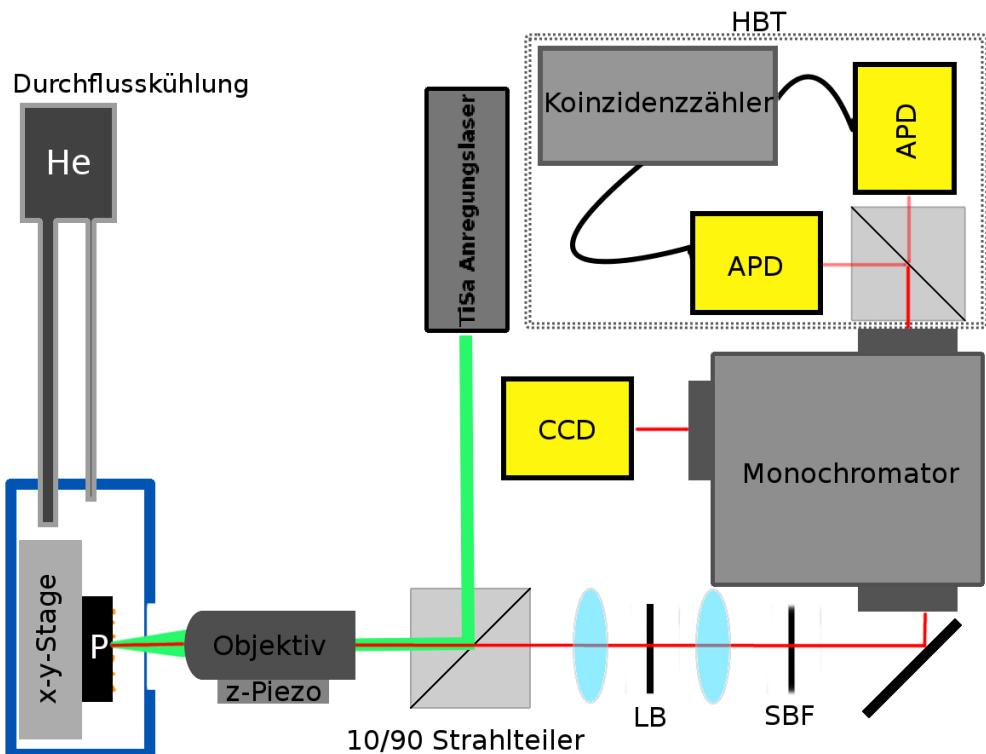


Abbildung 3.1: Schematischer Versuchsaufbau. Der Anregungslaser (grün) geht über einen Strahlteiler in das Objektiv, das auf die Probe (P) ausgerichtet ist. Diese befindet sich auf einem Objekttisch (*x-y*-Stage), der eine Auswahl des Probenpunktes ermöglicht. Das emittierte Licht (rot) geht durch das Objektiv zurück durch den Strahlteiler, durch zwei Linsen (blau), eine Lochblende (LB) und einen Schmalband-Filter (SBF). Das Objektiv bildet zusammen mit dem Strahlteiler, der Lochblende und der Linse ein konfokales Mikroskop. Im Monochromator wird das Licht spektral zerlegt und wahlweise auf eine Kamera (CCD) oder einen Hanbury-Brown-Twiss-Aufbau (HBT) gelenkt.

3.1. VERSUCHSAUFBAU

Die Probe (P) befindet sich in einem Kryostaten, der an eine Helium-Durchfluss-Kühlung angeschlossen ist. Im Kryostaten liegt die Probe auf einem Objekttisch, der mittels Schrittmotoren in der x - y -Ebene der Probe verfahren werden kann. Das vor dem Kryostaten befindliche konfokale Mikroskop (siehe Abschnitt 3.1.1) nimmt das von der Probe emittierte Licht auf. Dieses Licht passiert auf dem Weg zum Monochromator (siehe Abschnitt 3.1.2) einige spektral schmale Bandpassfilter. Ein Ausgang des Monochromators führt auf die eine CCD und der andere auf den Hanbury-Brown-Twiss-Aufbau mit zwei APDs (siehe Abschnitt 3.1.3).

3.1.1 Konfokales Mikroskop

Für die Untersuchung von Einzelphotonenquellen ist es wichtig das emittierte Licht möglichst effizient zu sammeln. Die Einzelphotonenquellen werden mit einem Laser angeregt, so dass bei der Detektion darauf geachtet werden muss, nur Licht zu detektieren, welches aus diesem Punkt emittiert wird. Streuung von Licht aus der Umgebung, sowie aus tieferen Schichten der Probe sollte nicht in die Detektion mit einfließen. Für diesen Zweck eignet sich ein konfokales Mikroskop, welches ausnutzt, dass die Tiefenschärfe einer Abbildung mit hoher numerischer Apertur und kurzer Brennweite gering ist [7]. In Abbildung 3.2 ist der Aufbau eines konfokalen Mikroskops skizziert. Der Laser zur Anregung wird über einen Strahlteiler durch das Objektiv auf die Probe gerichtet, die sich direkt in der Brennweite befindet. Das emittierte Licht geht zunächst durch das Objektiv und wird kollimiert. Ein Teil dieses Lichts passiert den Strahlteiler und wird durch eine Linse auf eine Lochblende (LB) fokussiert. Diese schneidet nur das Licht aus, welches aus dem Fokus des Objektives kommt. Hinter der Lochblende steht eine weitere Linse, die das Licht für den weiteren Strahlengang kollimiert und auf den Monochromator leitet (siehe Abschnitt 3.1.2).

3.1.2 Monochromator

Der Monochromator ist nach dem Czerny-Turner-Schema aufgebaut, welcher in Abbildung 3.3 skizziert ist. Er hat die Aufgabe das einfallende Licht spektral aufzuspalten und eine bestimmte Wellenlänge zu isolieren. Zunächst fällt das Licht durch eine Lochblende (LB1), welche in der Fokalebene des Hohlspiegels (HS1) steht. Die Lochblende sorgt dafür, dass das auf den Spiegel treffende Licht näherungsweise dem Licht einer Punktquelle entspricht. Der Hohlspiegel wirft den kollimierten Strahl auf ein optisches Gitter (OG). Im Experiment werden optische Gitter mit 1200 Linien/mm oder 1800 Linien/mm benutzt. Da Licht langer Wellenlänge stärker gebrochen wird als kurzwelliges Licht, ist der Winkel des reflektierten Strahles abhängig von der Wellenlänge. Durch diesen Winkelunterschied verschiebt sich auch für die verschiedenen Wellenlängen der Ort des Brennpunktes in der Fokalebene des zweiten Hohlspiegels. Eine zweite Lochblende (LB2) isoliert eine bestimmte Wellenlänge.

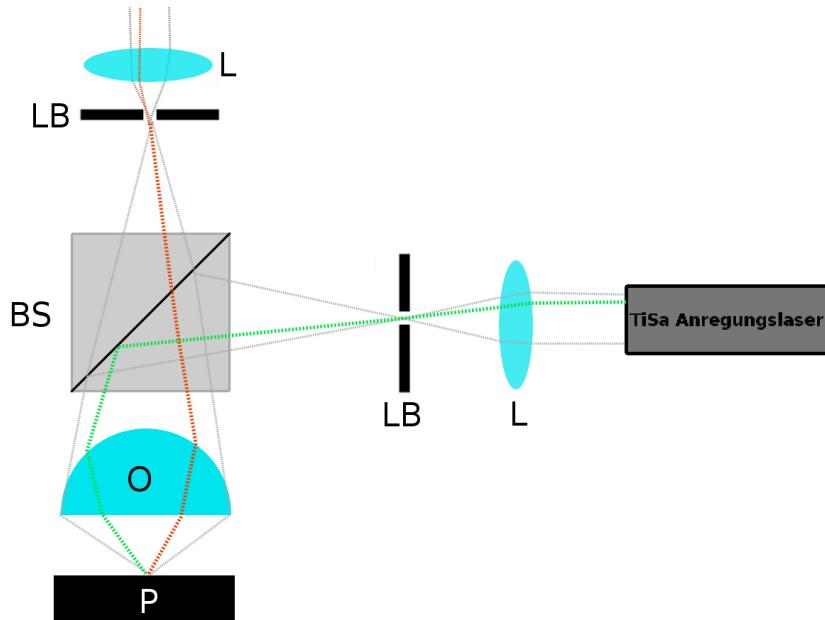


Abbildung 3.2: Ein konfokaler Aufbau besteht aus einer Anregungsquelle (hier Laser), die auf eine Lochblende (LB) ausgerichtet wird. Über einen Strahlteiler (BS) wird der Strahl durch ein Objektiv (O) gelenkt, welches den Strahl auf die Probe fokussiert. Das emittierte Licht (rot) wird über das Objektiv durch den Strahlteiler auf eine Lochblende fokussiert. Diese Lochblende sorgt für die Selektion des Lichtes aus der Fokusebene, welches auf den Detektor fällt.

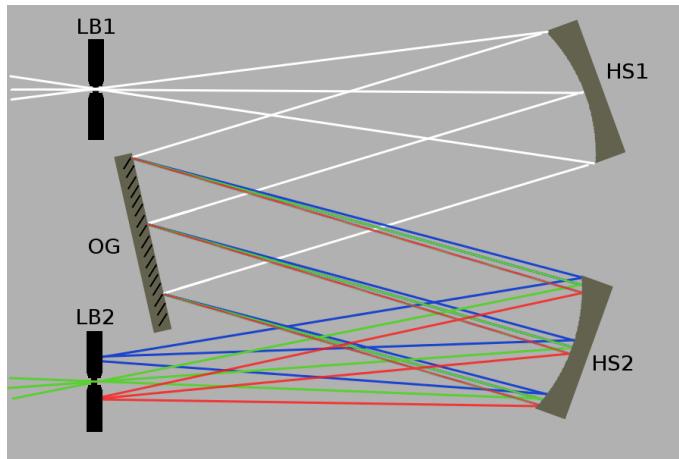


Abbildung 3.3: Czerny-Turner-Aufbau eines Monochromators. Licht fällt durch die Lochblende LB1, die im Fokus des Hohlspiegels HS1 steht. Der kollimierte Strahl fällt auf ein optisches Gitter (OG), welches das Licht spektral auftrennt. Über einen weiteren Hohlspiegel HS2 und eine im Fokus stehende Lochblende LB2 wird eine Wellenlänge isoliert.

3.1.3 Lawinen-Photodioden

Für bestimmte Messungen, wie die g^2 -Messungen (siehe Abschnitt 4.2), ist es notwendig einzelne Photonen nachzuweisen. Für diese Aufgabe eignen sich Lawinen-Photodioden (APD - engl. avalanche photo diode) oder Photoelektronen-Vervielfacher-

Röhren (PMT - engl. photo multiplier tubes) besonders gut. Durch sie entsteht aus einzelnen Photonen ein Elektronenstrom, der um fünf bis zwölf Größenordnungen größer ist als der eintreffende Photonenstrom [11]. Da im Experiment ausschließlich APDs verwendet werden, wird auf diese explizit eingegangen.

Eine APD ist ein pn-Übergang, in dem das intern ausgebildete elektrische Feld zwischen den Schichten besonders groß ist. Schon einzelne Photonen können durch Ionisation ein Elektron-Loch-Paar in der Raumladungszone erzeugen. Hier sorgt das ausreichend starke elektrische Feld für eine Beschleunigung des Elektron-Loch-Paares in entgegengesetzte Richtungen. Die dabei gewonnene kinetische Energie reicht für weitere Ionisation durch Stoßprozesse. Die neu entstandenen Elektron-Loch-Paare vervielfältigen sich lawinenartig und sorgen für einen leicht nachweisbaren Strom an den Endkontakteen.

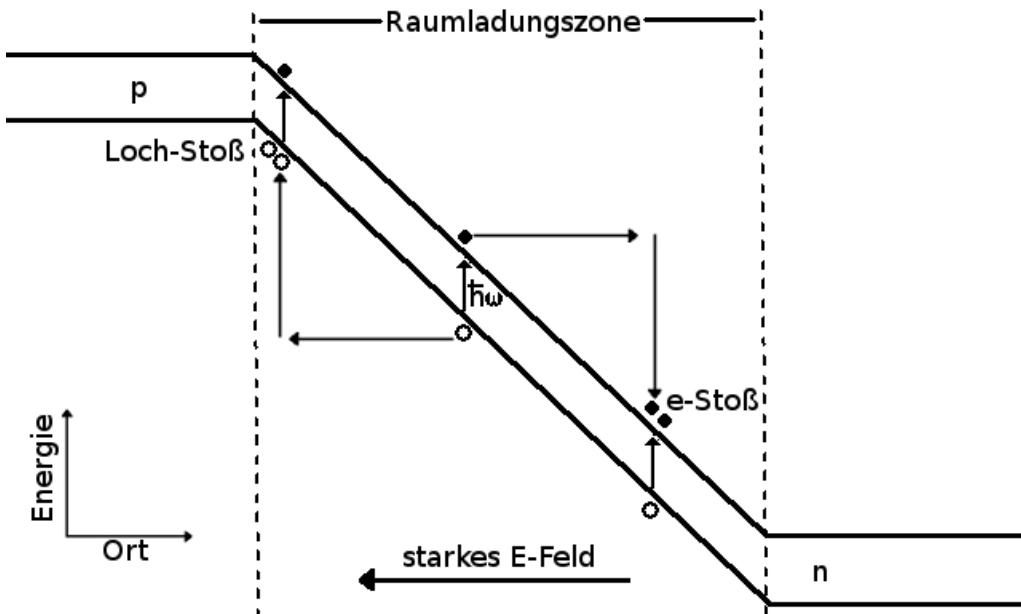


Abbildung 3.4: Bänder-Modell einer APD (Vgl. Abb. 9.8 in [11])

3.2 Probenstruktur

Die Probe besteht aus verschiedenen Schichten (siehe Abbildung 3.5). Das Substrat, auf dem die Schichten aufgetragen sind, ist GaAs [100]. Auf diesem Substrat ist ein Piezokristall für die räumliche Verzerrung der Quantenpunkte aufgebracht. Die Quantenpunkte sind zwischen zwei 148 nm Schichten aus GaAs aufgetragen, die in Abbildung 3.5 als eine zusammenhängende oberste Schicht auftaucht. Die Quantenpunktprobe mit Informationen zur Struktur wurde freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Johannes Wildmann und Armando Rastelli vom *Institute of Semiconductor and Solid State Physics, JKU Linz*.

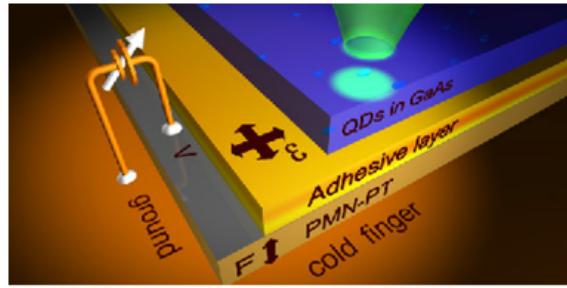


Abbildung 3.5: Probenstruktur: InAs Quantenpunkte eingebettet in GaAs (blau). Auf dem Substrat GaAs [100] ist als unterste Schicht ein Piezokristall (PMN-PT) aufgebracht. Zwischen dieser und der obersten Schicht befindet sich eine Klebeschicht (engl. *adhesive layer*) aus Chrom und Gold. Entnommen aus [10], © *Physica Status Solidi* 2012.

3.3 Grundlagen des Programms *QDSearch*

Das Programm *QDSearch* wurde in der Programmiersprache *Python* geschrieben. Sie unterstützt sowohl objektorientierte als auch funktionale Ansätze und legt ihren Schwerpunkt auf Lesbarkeit und Übersichtlichkeit des Quelltextes. In der Umsetzung des Programms wurden mehrere Pakete, wie *serial* und *traitsUI*, verwendet, welche die Kommunikation mit seriellen Schnittstellen und den grafischen Darstellungen von Objekten für den Benutzer ermöglichen [8]. Die verschiedenen Geräte, wie Kamera, Kryostat, Mikroprozessor und Monochromator (siehe Abschnitt 3.1), wurden bereits in dem Programm miteinander verknüpft. Für jedes der Geräte existiert eine eigene Klasse *controls*, die die hardwarespezifischen Befehle zum Einstellen bestimmter Eigenschaften oder zum Auslesen der Daten kennt. Beispielsweise hat die Klasse *controls.spectro* Methoden zum Einstellen der Wellenlänge und der Spaltbreite des Spektrometers (siehe Listing 3.1).

```

1 def wavelength_goto(self, aim):
2     aim=round(aim,3)
3     self.write(str(aim)+"\u21d3GOTO\u21d3\r")
4
5 def set_ent_slit_width(self, width):
6     self.write("SIDE-ENT-SLIT\u21d3\r")
7     self.write(str(width)+"\u21d3MICRONS\u21d3\r")

```

Listing 3.1: Methoden zum Einstellen der Wellenlänge und Spaltbreite in *controls.spectro*

3.3. GRUNDLAGEN DES PROGRAMMS *QDSEARCH*

Für jedes Gerät existiert noch eine weitere Klasse *views*, die eine angepasste Benutzeroberfläche mit Knöpfen und Eingabefeldern generiert. Hier am Beispiel des Spektrometers wird verdeutlicht, wie Befehle mit einer grafischen Oberfläche zusammenarbeiten (siehe Listing 3.2 und Abbildung 3.6).

```
1 def __goto_fired(self):
2     self.icSpectro.wavelength_goto(self.centerwvl)
3     self.icSpectro.waiting()
4
5 def __slit_width_in_changed(self):
6     self.icSpectro.set_ent_slit_width(self.slit_width_in)
```

Listing 3.2: Methoden zum Einstellen der Wellenlänge und Spaltbreite in *views.spectro*

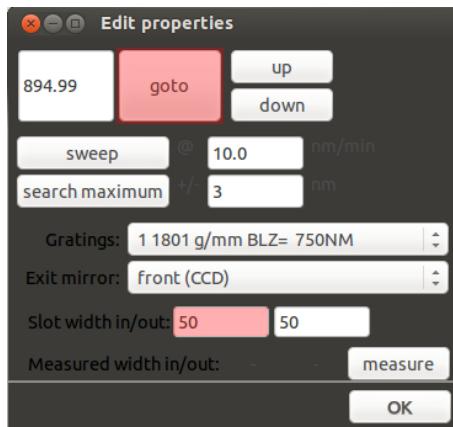


Abbildung 3.6: *Graphical User Interface* für das Spektrometer. Rot hinterlegt die im Listing 3.2 aufgeführten Knöpfe.

Kapitel 4

Stabilisierung

4.1 Notwendigkeit der Stabilisierung

Die Aufbau ist störanfällig gegenüber äußeren Einflüssen, da die zu vermessenden Einzelphotonenquellen scharf lokalisiert sind. Ausschließlich das Licht dieser Quellen soll in die Messung einfließen. Ein konfokales Mikroskop ist für diesen Zweck auf sie ausgerichtet. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise schon geringe Änderungen der Temperatur im Labor die Messung verfälschen können. Solche Temperaturänderungen liegen typischerweise im Bereich einzelner Kelvin. Die thermische Ausdehnung der Probe oder der Bestandteile des Aufbaus führen zu einer örtlichen Verschiebung des Quantenpunktes. Dieser kann aus dem Fokus des Mikroskops heraus wandern, so dass das Messsignal verschwindet. Weiterhin ist eine externe Störung des Aufbaus, u.a. durch Anstoßen des Labortisches oder Vibrationen des Bodens, nicht auszuschließen.

4.2 g^2 -Messung zur Charakterisierung von Quantenpunkten

Zur Charakterisierung von Einzelphotonenquellen werden die Autokorrelationsfunktionen zweiter Ordnung (siehe Abschnitt 2.1.3, kurz g^2 -Messungen) gemessen. Für eine solche Messung wird das Licht der Einzelphotonenquelle auf einen Strahlteiler gerichtet. Die beiden Ausgänge des Strahlteilers führen jeweils auf eine APD (siehe Abbildung 3.1). Der Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Abstand einer Photonenendetektion in beiden APDs und der Anzahl der gemessenen Ereignisse ergibt bei einer Einzelphotonenquelle den in Abbildung 2.1 typischen Verlauf.

Für eine aussagekräftige g^2 -Messung benötigt man eine ausreichend große Anzahl an Ereignissen. Vorzugsweise wird in diesem Experiment eine Einzelphotonenquelle bei 894,35 nm gesucht, da dies ein angestrebter Frequenzstandard ist. Da aber jeder Quantenpunkt, sowohl in seinem Emissionsspektrum als auch in seiner Emissionsrate, unterschiedlich ist, ist es nicht garantiert, dass die spektral in Frage kommenden Quantenpunkte auch hell genug sind. Deshalb muss eine zeitliche Stabilität des Messaufbaus gewährleistet werden, damit auch über Zeiträume von Stunden bis Tagen eine Messung durchgeführt werden kann.

4.3 Beschreibung der Autofokussierung

Da sich die Probe über die Messung in alle drei Raumrichtungen aus dem Fokus des konfokalen Mikroskops verschieben kann, muss es für jede dieser Richtungen eine Kompensation geben. Die Bewegung entlang der z -Achse kann dadurch ausgeglichen werden, dass der Fokus des Mikroskops nachgeregelt wird. Dies geschieht über eine variable Spannung eines Mikroprozessors, der die Dicke eines Piezokristalls des Objektives in z -Richtung verändern kann. Die Bewegung der Probe in der $x-y$ -Ebene im Kryostaten lässt sich durch die Schrittmotoren eines Objekttisches kompensieren, der, genau wie der Mikroprozessor, über eine serielle Schnittstelle angesprochen werden kann.

4.3.1 Ansätze zur Realisierung der Autofokussierung

Da die Autofokussierung nicht zeitgleich zur g^2 -Messung durchgeführt werden kann, ist es sinnvoll die Probe nur dann neu zu fokussieren, wenn die Zählrate unter einen gewissen Grenzwert fällt. Als Zusatz kann die Autofokussierung in langen, zeitlich gleichen Abständen aktiviert werden, um kleinere Verschiebungen zu korrigieren. Die Aktivierung der Autofokussierung kann in zwei Schritten erfolgen. Im ersten Schritt wird das Signal über einen Algorithmus maximiert, der die Spannung am Piezokristall steuert. Dies korrigiert die Verschiebung der Probe in z -Richtung.

Im zweiten Schritt durchfährt ein Algorithmus die Positionen der Probe auf dem Objekttisch in der $x-y$ -Ebene und bringt den Quantenpunkt zurück in den Fokus des konfokalen Mikroskopes. Es ist von besonderem Vorteil, dass hierzu das Mikroskop nicht in $x-y$ -Richtung bewegt werden muss, da so der ursprüngliche Strahlengang erhalten bleibt.

4.3.2 Algorithmus für die Piezo-Steuerung (z -Autofokussierung)

Es wird angenommen, dass das Messsignal im Fokus des konfokalen Mikroskops am stärksten ist und außerhalb des Fokus monoton abfällt. Es wurde ein Algorithmus implementiert, der diese Eigenschaft ausnutzt. Der Algorithmus unterteilt die Steuerspannung des Piezokristalls, die im Bereich von null bis fünf Volt liegt, in n Abschnitte. In der Mitte jedes Abschnittes wird das Signal überprüft und das Maximum ermittelt. Nun wird der Bereich um dieses Maximum wieder in n Abschnitte unterteilt und von diesen Teilen wieder das Maximum gesucht. Dieses Verfahren kann nun iterativ durchgeführt werden, bis das globale Maximum mit der technisch möglichen Genauigkeit erreicht wurde. In der Praxis wurde $n = 10$ gewählt, das Verfahren drei mal iteriert und so die technisch mögliche Genauigkeit ausgeschöpft.

Bei der Aktivierung der Autofokussierung (siehe Listing 4.1) werden einige Parameter gesetzt. Zum Anfang (Z. 2) wird die Funktion `afrange()` aufgerufen. Diese bietet die Möglichkeit für den Benutzer einen Bereich im Spektrum zu wählen, in dem das Messsignal maximiert werden soll. Es folgt die Initialisierung (Z. 3-9) der benutzen Variablen. Die erste **for**-Schleife (Z. 11) implementiert die Suche nach dem Maximum wie oben beschrieben. Ein anschaulicher Vorgang des z-Scans findet sich in Abbildung 4.1. Das Programm merkt sich den Spannungswert der mit dem maximalen Signal einhergeht (Z. 22). Dieser Spannungswert wird am Ende des Al-

gorithmus (Z. 27) eingestellt. Die Maximierung des Signals in z -Richtung ist damit abgeschlossen.

```

1 def zautofocus_thread(self):
2     self._from, self._to = self.afrange()
3     maxid = 0
4     maxcount = 0 #Maximale Counts, setze auf 0
5     maxvolt = float(0)
6     shift = float(0)
7     steps = float(10)
8     pvolt = 5. # Maximale Steuerspannung fuer den Piezo
9     iterations = int(3) #speed linear in n,2 fast,3 exact
10
11    for it in range(iterations):
12        shift = shift+maxid*(pvolt/10**it)/steps
13        for i in range(int(steps)):
14            volt = float((i+0.5)*pvolt/(10**it)/steps+shift)
15            self.ivVoltage.Voltage = volt
16            self.acquisition()
17            self.progress = str(int(
18                ((it+1)*(i+1))*100/(iterations*steps)
19            ))
20            if int(self.progress)%10 == 0: #plot 10 times
21                self.plot_data()
22            if maxcount < max(self.line[self._from:self._to]):
23                maxcount = max(self.line[self._from:self._to])
24                maxvolt = volt
25                maxid = i
26
27    print "Im Fokus bei der Spannung %1.1f" % maxvolt
28    self.ivVoltage.Voltage = maxvolt
29    self.acquisition()
30    self.plot_data()
```

Listing 4.1: Algorithmus der Autofokussierung in z -Richtung der Kamera.

4.3.3 Algorithmus für den Kryostat-Schrittmotor (x - y -Autofokussierung)

Für den optimalen Einfang des Lichtes der Quantenpunkte sollen diese nicht nur in z -Richtung in der Fokusebene des konfokalen Mikroskops liegen. Weit mehr Messlichtverlust ergibt sich bei einer seitlichen Verschiebung in der x - y -Ebene, die den Quantenpunkt vergleichsweise schnell aus dem Fokus bringt. Die kleinste Schrittweite des Schrittmotors beträgt 100 nm. Da die Quantenpunkte zu einer Größe von schätzungsweise 500 – 1000 nm aufgelöst werden, sind es, unter der Annahme der Symmetrie der Quantenpunkte, maximal fünf Schritte bis das Signal vollständig außerhalb des Fokus ist. Aus diesem Grunde kommt ein Algorithmus, wie er in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurde, nicht in Frage, da das Signal, das von mehreren

4.3. BESCHREIBUNG DER AUTOFOKUSSIERUNG

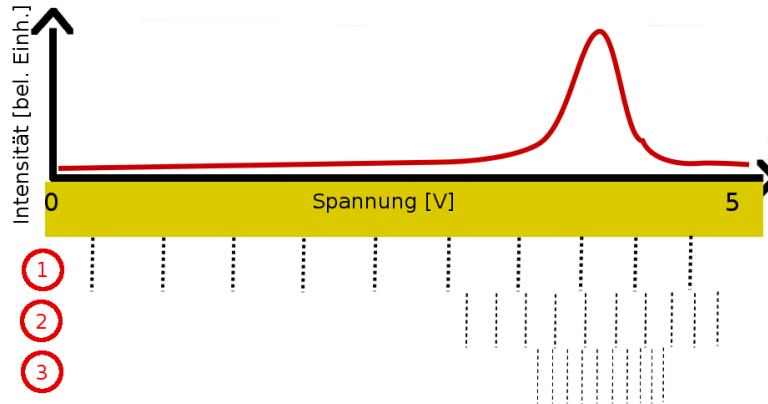


Abbildung 4.1: Grafische Darstellung des Suchalgorithmus in z -Richtung. Oben ist der schematische Zusammenhang zwischen Steuerspannung des Piezokristalls und des Messsignals angedeutet. Die unteren drei Iterationsschritte entsprechen der Maximierung über jeweils 10 verschiedenen Spannungswerte (grau gestrichelt).

Quantenpunkten auf der Probe ausgesendet wurde, im großen Maßstab zu unstetig ist. Bei zu großen Schrittweiten des Schrittmotors ist nicht gewährleistet, dass alle Quantenpunkte entdeckt werden. Bei zu kleinen Schrittweiten erhält man präzise Messergebnisse. Da aber für jeden Schritt und Messprozess ein Bild aufgenommen werden muss, dauert dieses Verfahren zu lange für eine effektive Maximierung.

Für die Maximierung und damit auch Stabilisierung eines bereits gefundenen Quantenpunktes reicht es aus auf ein einfaches Optimierungsverfahren zurückzutreten. Der *Hill-Climbing*-Algorithmus ist dafür geeignet das nächstliegende lokale Maximum zu finden und geht dabei in folgenden Schritten vor:

1. Ändere das Argument der Funktion in eine Richtung.
2. Wird der Funktionswert kleiner: Ändere die Richtung.
3. Wird der Funktionswert größer: Ändere das Argument weiter in diese Richtung.
4. Tue dies solange, bis der Funktionswert wieder kleiner wird.
5. Gehe nun wieder einen Schritt zurück zum lokalen Maximum.

Als naiver Ansatz führt dieser Algorithmus in der Umgebung von 5 kleinsten Schritten des Schrittmotors schnell zum Ziel. Jedoch ergibt sich durch die Funktionsweise des Schrittmotors ein Problem bei diesem Verfahren. Da verständlicherweise auf die kleinstmögliche Schrittweite des Motors zurückgegriffen wird um das Signal zu maximieren, ist die Hysterese des Motors nicht mehr vernachlässigbar. Insbesondere bei einem Richtungswechsel des Motors beträgt die Wahrscheinlichkeit ungefähr 50 %, dass der Schritt nicht durchgeführt wird. Dies ist besonders problematisch für den letzten Abschnitt des *Hill-Climbing*-Algorithmus, da in diesem der Schrittmotor auf das Maximum zurückgefahren wird.

Als Lösung wird folgender modifizierter Algorithmus vorgeschlagen:

Ein Algorithmus maximiert das Signal nacheinander für die x -Achse und y -Achse. Die Maximierung einer Achse wird in folgenden Schritten erreicht (siehe Listing 4.2):

1. Der Benutzer definiert (Z. 2) den abgeschätzten Radius eines Quantenpunktes in Einheiten der kleinsten Schrittweite des Motors.
2. In der ersten **for**-Schleife (Z. 20) fährt der Motor bis an den Rand des Quantenpunktes.
3. Bei jedem Schritt speichert er in der Variable *current* die lokale Signalstärke des Quantenpunktes.
4. Das bisher stärkste Signal wird in der Variable *counts* gespeichert.
5. Zusätzlich wird die Differenz zum bis dahin zweit-stärksten Signal in der Variable *diff* gespeichert.
6. In der zweiten **for**-Schleife (Z. 29) fährt der Motor schrittweise zurück auf die andere Seite des Quantenpunktes.
7. Es wird ebenfalls bei jedem Schritt das stärkste Signal und die Differenz zum vorhergehenden stärksten Signal des Quantenpunktes gespeichert.
8. In der dritten **for**-Schleife (Z. 38) wird das in Punkt 7 identifizierte Maximum angefahren. Abbruchkriterium der Suche (Z. 41) ist: Das gemessene Signal in der Variable *current* ist größer als die Differenz des vorherigen Maximums mit dem Abstand zwischen den beiden Maxima *counts - diff/2*.

```

1 def __autofocus_simple_thread( self ) :
2
3     self.__from , self.__to = self.afrange() # Auswahl des QP
4     sm = self.icCryo.sm # Laden der kleinsten Schrittweite
5     self.progress = str(0) # Ladebalken auf 0 setzen
6     self.scan_simple(sm,0) # Aufruf: Maximierung x-Richtung
7     self.progress = str(50) # Ladebalken auf 50% setzen
8     self.scan_simple(0,sm) # Aufruf: Maximierung y-Richtung
9     self.progress = str(100) # Ladebalken auf 100% setzen
10    print "x-y-plane maximized" # User Info
11
12 def scan_simple( self ,x,y) :
13
14     radius = 7 # Abgeschaetzer Radius des QP
15     # Variablen initialisieren
16     counts = int(0)
17     current = int(0)
18     diff = int(0)
19
20     for i in range(radius):
21         self.acquisition() # Speichert Bild in self.line
22         current = max(self.line[ self.__from : self.__to ])
23         if current >= counts:
24             diff = current - counts
25             counts = current
26             self.plot_data()

```

4.3. BESCHREIBUNG DER AUTOFOKUSSIERUNG

```

27     self.icCryo.rmove(x,y)
28
29     for i in range(2*radius):
30         self.acquisition() # Nimmt Bild in self.line auf
31         current = max(self.line[self._from:self._to])
32         if current >= counts:
33             diff = current - counts
34             counts = current
35         self.plot_data()
36         self.icCryo.rmove(-x,-y)
37
38     for i in range(2*radius):
39         self.acquisition() # Nimmt Bild in self.line auf
40         current = max(self.line[self._from:self._to])
41         if current >= counts - diff / 2:
42             break
43         self.icCryo.rmove(x,y)

```

Listing 4.2: Algorithmus für die Autofokussierung in x - y -Richtung des Kryostaten.

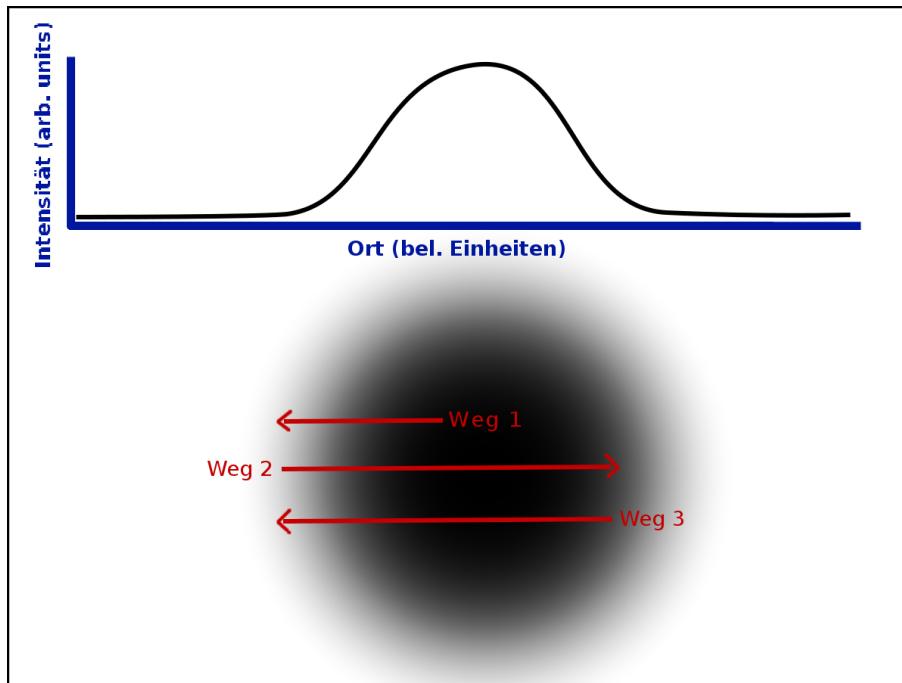


Abbildung 4.2: Algorithmus für die Maximierung in der x - y -Ebene. Das obere Bild veranschaulicht den schematischen Zusammenhang zwischen Zählrate des Detektors und dem Ort der Probe auf einer Achse. Auf dem unteren Bild werden die Wege skizziert, auf den sich der Kryostat für die x - y -Autofokussierung bewegt. Auf Weg 1 und 2 wird das maximale Signal identifiziert. Auf Weg 3 wird das identifizierte Maximum angefahren. Nur zur Veranschaulichung liegen die Wege versetzt zueinander. Tatsächlich bewegt sich der Kryostat nur entlang einer Achse. Die Maximierung findet nacheinander für beide Achsen statt.

Der Algorithmus in dieser Form schließt den Fehler durch Hysterese des Motors weitestgehend aus, da dieser vermehrt bei Richtungswechseln auftritt und der Richtungswechsel weit außerhalb des Maximums des Punktes stattfindet. Das Abbruchkriterium ist so gewählt, dass es statistisch wahrscheinlich ist zu dem zuvor identifizierten Maximum zurückgekehrt zu sein.

4.4 Restrukturierung des Programms

Ein wichtiger Teil der Stabilisierung des Aufbaus ist, neben der zeitlichen Erhaltung des Messsignals, die Erweiterbarkeit des Programms. Es sollte gewährleistet sein, dass das Programm von anderen Experimentatoren leicht durchschaubar ist, und dass weitere Module leicht hinzugefügt werden können. Weiterhin ist es wichtig, dass neue Hardware in das bestehende Programm leicht integriert werden kann ohne bereits bestehende Teile des Programms umschreiben zu müssen. Unter diesen Aspekten wurde das ursprüngliche Programm überarbeitet und in einigen Kernbereichen restrukturiert.

4.4.1 Kommunikation unter den Klassen

Die bestmögliche Übersicht über alle Klassen erfolgt durch eine untereinander unabhängige Anordnung aller Klassen. Jede Klasse die einen Teil des Aufbaus repräsentiert steht für sich unabhängig und hat keine immanente Verknüpfung zu anderen Klassen der Geräte [8]. Für einige Zwecke ist es jedoch nötig, dass ein Teil des Aufbaus einen anderen steuert. Beispielsweise soll die Kamera für eine Optimierung der Probenposition den Schrittmotor im Kryostaten verschieben. Deshalb muss zwischen manchen separaten Klassen eine Verknüpfung erschaffen werden. Diese Verknüpfungen wurden in der Hauptklasse je nach Bedarf angelegt (siehe Listing 4.3). Alle *Instanzen*, also von Klassen erzeugte Objekte zur tatsächlichen Verwendung der Klasse, werden in dem Programm mit einem **i** gekennzeichnet. Als zweites Zeichen im Namen der Instanz steht ein **v** oder **c**, welches darauf hinweist, ob die Instanz einer *views-* oder *controls-*Klasse angehört. Beispielsweise wäre die Instanz **ivCamera** das Objekt, welches für die grafische Darstellung des Kamera verantwortlich ist. In der Hauptklasse, in der alle Klassen zusammengeführt werden, existieren **_default**-Methoden. Diese zeigen der Hauptklasse an, aus welchen Klassen die Instanzen erzeugt werden sollen. Am Beispiel der Kamera (siehe Listing 4.3) wird in der **_default**-Methode (Z. 1) auf die Klasse *views.camera.CameraGUI* verwiesen, für jedes Mal, dass in der Hauptklasse das Objekt *ivCamera* verwendet wird. Man erkennt (Z. 3-6), dass der Kamera im Programm der Zugriff auf den Schrittmotor des Kryostaten, die Spannungsregelung des Piezokristalls des Objektives und auf das Spektrometer ermöglicht wird.

```

1 def __init__(self):
2     print "CAMERA INIT"
3     return views.camera.CameraGUI(
4         ivCryo=self.ivCryo,
5         ivVoltage=self.ivVoltage,
6         ivSpectro=self.ivSpectro)

```

```

7     def __ivCryo_default(self):
8         print "CRYO_INIT"
9         return views.cryo.CryoGUI()
10
11    def __ivSpectro_default(self):
12        print "SPECTRO_INIT"
13        return views.spectrometer.SpectroGUI(ivVoltage=self.
14            ivVoltage)
15
16    def __ivVoltage_default(self):
17        print "VOLTAGE_INIT"
18        return views.voltage.VoltageGUI()

```

Listing 4.3: Verlinkung der Klassen untereinander im Hauptprogramm.

4.4.2 Shiftspeeds, Readmode, Acquisitionmode

Die leichte Erweiterbarkeit des Programms soll am Beispiel der verwendeten Kamera *Andor SDK* erläutert werden. Die Kamera besitzt verschiedene Betriebsmodi. Je nach Wunsch des Benutzers können zwischen verschiedenen horizontalen und vertikalen Auslesegeschwindigkeiten (*vertical/horizontal shift speed - VSS and HSS*) gewechselt werden. Diese Auswahlmöglichkeiten bei den Geschwindigkeiten bieten einen Kompromiss aus Bildrate und Signal-Rauschverhältnis [1]. Dies ist wichtig um Messungen je nach Bedarf zu gestalten. Der Auslesemodus (*engl. readmode*) gibt die Möglichkeit zwischen *full vertical binning - FVB* und *image* umzuschalten. Dies entscheidet, ob aus den 128x1024 Pixeln ein Falschfarben-Plot erstellt wird oder alle Pixel einer Spalte zusammengefasst werden, um eine spektrale Analyse der Probe zu ermöglichen (siehe Abbildung 4.3).

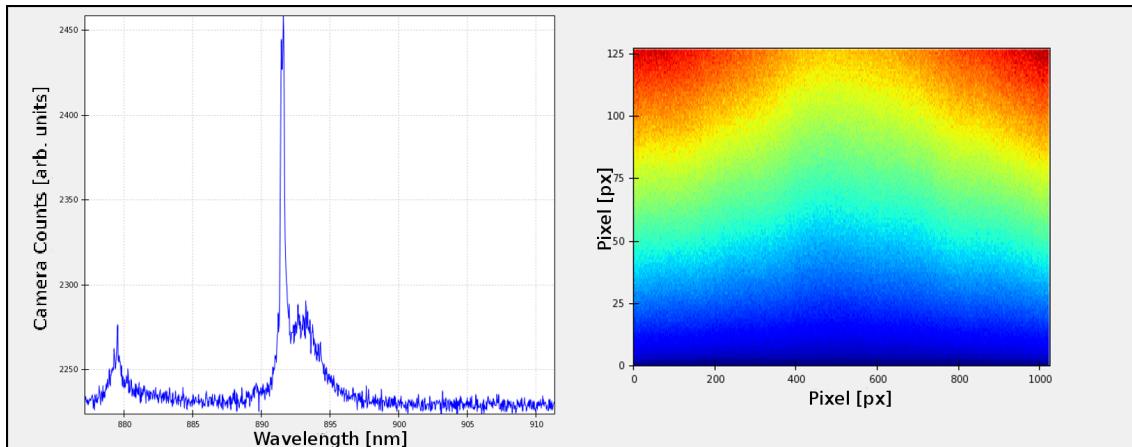


Abbildung 4.3: Bild der *Andor SDK* im FVB (links) und Imagemode (rechts) aufgenommen. FVB erlaubt eine spektrale Analyse und der Imagemode eine örtliche Untersuchung des Quantenpunktes.

Weiterhin gibt es einen Aufnahmemodus (*engl. acquisitionmode*), der einstellt, ob die Kamera ein einzelnes Bild mit bestimmter Belichtungszeit (*engl. one shot*) aufnimmt, oder über mehrere Einzelbilder integriert.

Diese Eigenschaften können bei verschiedenen Kameratypen variieren. Der folgende Code verdeutlicht, wie eine Einbettung erschaffen wurde, die es ermöglicht mit wenigen Zeilen eine neue Kamera in das Programm einzubinden. In der *control*-Klasse der Kamera wird eine Variable *Hshiftspeed_dict* des Typs *dict* erstellt (Z. 2). In diesem werden aus dem *Andor SDK*-Handbuch die HSS mit ihren Befehlen gelistet. Man erkennt (Z. 3): der HSS 100kHz gehört zu dem Befehl 0. Es wird zur späteren Verwendung eine Liste der *keys* erstellt (Z. 4), das heißt aller HSS, in diesem Fall (100kHz, 50kHz, 32kHz). Der Kern des Programms ist die Methode zur Änderung des HSS (Z. 6). Sie prüft, ob die Änderung nur simuliert oder der Befehl zum Ändern ausgeführt werden soll (Z. 10-11). Der anfangs der Methode übergebene Geschwindigkeitswert *name* wird hier benutzt um den zugehörigen Befehl aus der Variable *Hshiftspeed_dict* zu beziehen.

```

1 #section for Hshiftspeed
2 Hshiftspeed_dict =
3 {'100\u00b5Hz':0, '50\u00b5Hz' :1, '32\u00b5Hz':2}
4 Hshiftspeed_keys = Hshiftspeed_dict.viewkeys()
5
6 def setHshiftspeed(self ,name):
7     if self.simulation:
8         print "simulation\u2014Hshiftspeed\u2014set\u2014to" , name
9     else:
10        self.atm.SetHSSpeed(c_int(0),
11                           c_int(self.Hshiftspeed_dict [name]))
12        print "Hshiftspeed\u2014set\u2014to" , name

```

Listing 4.4: HSS Implementierung in controls.camera

In dem Listing 4.5 werden die vorher definierten *keys* des *HSS* in einen Editor geladen, der die verschiedenen Geschwindigkeiten dem Benutzer zur Auswahl bietet. Ändert der Benutzer den Wert im Editor ruft das Programm in Zeile 8 die in Listing 4.4 aufgeführte Methode *setHshiftspeed* auf, die die Kameraeinstellung verändert.

```

1 #Initialisierung der Variablen
2 Hshiftspeed_keys = List( list(icCamera.Hshiftspeed_keys) )
3
4 Item('Hshiftspeed',
5     label="Horizontal Speed",
6     editor=EnumEditor(name='Hshiftspeed_keys'))
7
8 def _Vshiftspeed_changed(self):
9     self.icCamera.setVshiftspeed(self.Vshiftspeed)

```

Listing 4.5: HSS Implementierung in views.cameraGUI

Wird nun eine neue Kamera in den Aufbau integriert, weil beispielsweise festgestellt wurde, dass die Empfindlichkeit der CCD für die Messung nicht ausreicht, muss lediglich in Listing 4.4 die Zeile 3 mit den neuen Befehlen angepasst werden.

4.4.3 Berechnung und Markierung von Zielfrequenzen

Das Programm wurde um einige Funktionen erweitert, die sich bei der Suche nach geeigneten Quantenpunkten als nützlich herausstellt haben. Geeignete Quantenpunkte sind solche, die Licht bei einer Wellenlänge von 894,35 nm aussenden. Diese Wellenlänge entspricht der Frequenz eines bestimmten Übergangs des Cäsium-Atoms, welcher als internationaler Frequenzstandard angestrebt wird. Die auf der Probe mit dem Programm identifizierten Quantenpunkte haben jedoch Wellenlängen in unterschiedlichen Bereichen. Durch Filter hinter dem konfokalen Mikroskop und die Wellenlängenisolation durch den Monochromator fällt nur noch Licht aus einem schmalen Wellenlängenbereich auf die Kamera. Doch um Abstände der Emissionslinien der Quantenpunkte von 894,35 nm auf wenige 0,01 nm genau abschätzen zu können bietet sich eine Frequenzmarkierung an. Diese wurde zusammen mit einer Bereichsauswahl der Achsen im Graphen realisiert (siehe Abbildung 4.4).

Um zu garantieren, dass das gemessene Spektrum auch die Genauigkeit erreicht, die der Frequenzstandard vorgibt, ist es nötig die Achsen regelmäßig zu kalibrieren. Für eine Kalibrierung eignet sich ein Laser, der bei einer bekannten Wellenlänge emittiert. Im Aufbau verwendet wurde ein Yttrium-Vanadat-Laser. Das Lasersignal kann über die Kamera aufgenommen werden. Auf der *x*-Achse lässt sich der Pixel identifizieren, auf dem das Maximum des Lasers liegt. Dieser Pixel kann dann, wie in Abbildung 4.5 gezeigt, eingetragen werden. Die Kamera verwendet fortan diesen Pixel mit entsprechender Wellenlänge zur Berechnung aller weiteren Pixel.

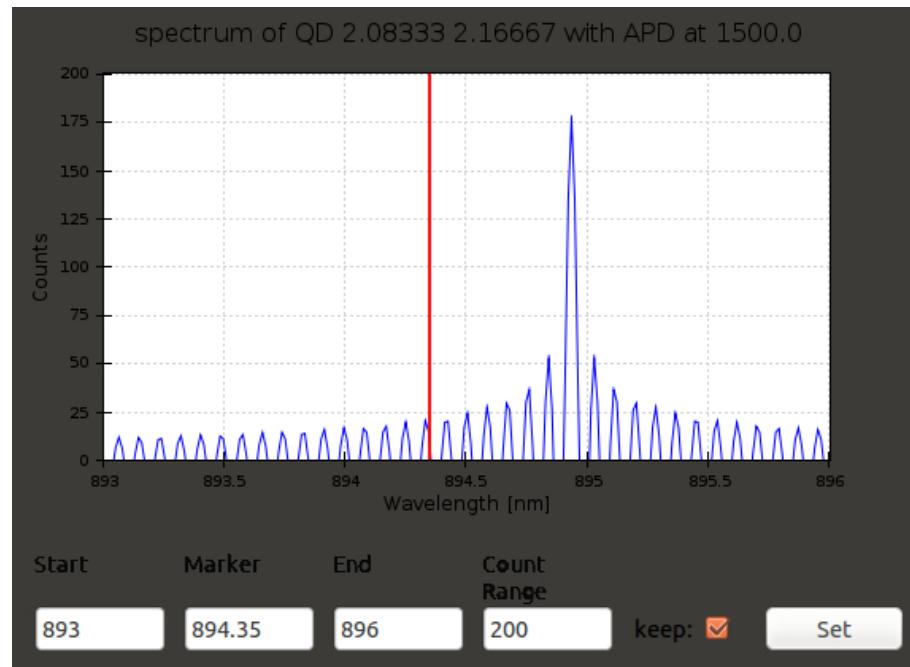


Abbildung 4.4: Frequenzmarkierung (rot) in einem simulierten Spektrum (blau) für die Suche nach Quantenpunkten mit Bereichsauswahl für das Diagramm.

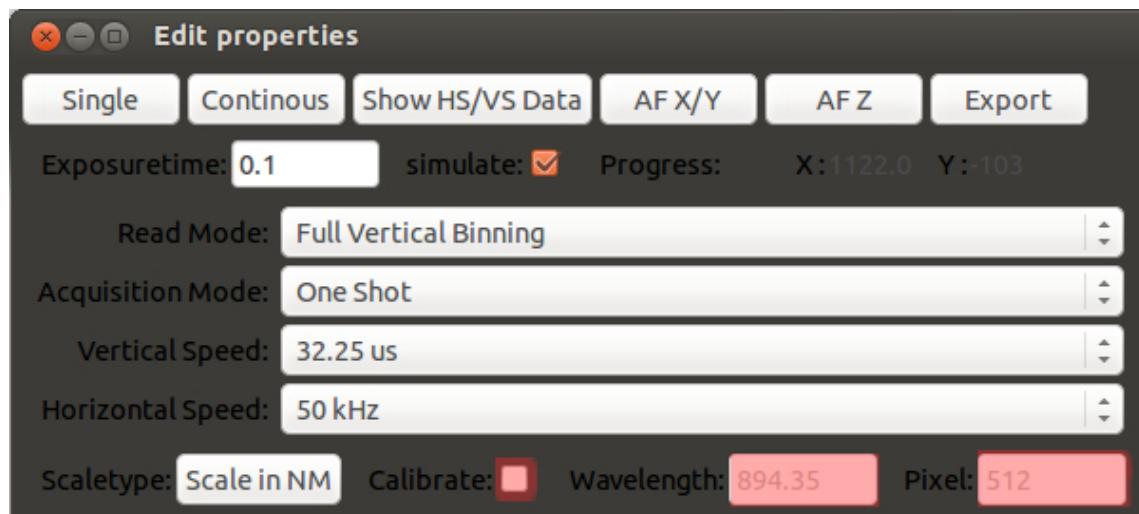


Abbildung 4.5: Kalibrierungsmöglichkeit der Kamera (rot hinterlegt).

4.5 Performance

Die Qualität der Autofokussierung lässt sich durch zwei Größen definieren. Die Geschwindigkeit des Findens des Maximums und der Zuverlässigkeit des Algorithmus.

Die Geschwindigkeit der z -Autofokussierung über den Piezokristall ist nur abhängig von der eingestellten Belichtungszeit. Werden typische Belichtungszeiten im Bereich von Millisekunden gewählt so benötigt er unter 40 Sekunden für das Finden des Maximums. Die Zählrate ist stark abhängig von der Steuerspannung des Piezokristalls. Aus diesem Grund iteriert der Algorithmus für die z -Autofokussierung (beschrieben in Listing 4.1) so oft, bis die Steuerspannung nicht mehr feiner eingestellt werden kann. Bei genügend hoher Signalstärke ist der Wert für die Steuerspannung nach dem Durchlauf des Algorithmus für die Autofokussierung exakt reproduzierbar.

Die Geschwindigkeit der x - y -Autofokussierung hängt davon ab, wie weit entfernt das Maximum vom Fokus des Objektives ist. In Tabelle 4.1 wurden die Zeiten für drei x - y -Fokussierungen aufgelistet. Der Durchschnitt beträgt 132 Sekunden. Diese Zeit kann um den Faktor $\frac{1}{2}$ verkürzt werden, wenn darauf verzichtet wird jeden Schritt des Algorithmus als Bild abzuspeichern, was in der Laborpraxis im Allgemeinen nicht benötigt wird.

Messdurchlauf	Zeit [s]
1	209
2	92
3	94
Durchschnitt	131.7

Tabelle 4.1: Geschwindigkeit der Autofokussierung in x - y -Richtung

Eine Abspeicherung erfolgte in diesem Fall, um eine zeitliche Darstellung der x - y -Autofokussierung (siehe Abbildung 4.6) aufzuzeichnen. Die Autofokussierung wurde auf 892 nm eingestellt, ein Bild bei jedem Schritt aufgenommen und in einem Wasserfall-Diagramm dargestellt. Man erkennt, dass bei dieser Wellenlänge über eine Zeit von 90 Sekunden vier Peaks erscheinen.

Der erste Peak entspricht der zufälligen Anfangseinstellung. Wie in Abbildung 4.2 beschrieben, fährt der Kryostat auf Weg 1 und Weg 2 durch den Quantenpunkt durch, bis das Signal verschwindet. Beim zweiten Peak wurde das Maximum in x -Richtung identifiziert und die Suche wegen des beschriebenen Abbruchkriteriums in Listing 4.2 (Z. 41) abgebrochen. Nun wird derselbe Algorithmus in y -Richtung durchgeführt. Auf Weg 1 der Abbildung 4.2 verschwindet das Signal kurzzeitig und taucht wieder auf, wenn der Quantenpunkt auf Weg 2 komplett durchfahren wird (Peak drei in Abbildung 4.6). Auf dem dritten Weg fährt der Kryostat zurück durch den Quantenpunkt und stoppt den Schrittmotor abermals, wenn das Abbruchkriterium erfüllt wurde (Peak vier).

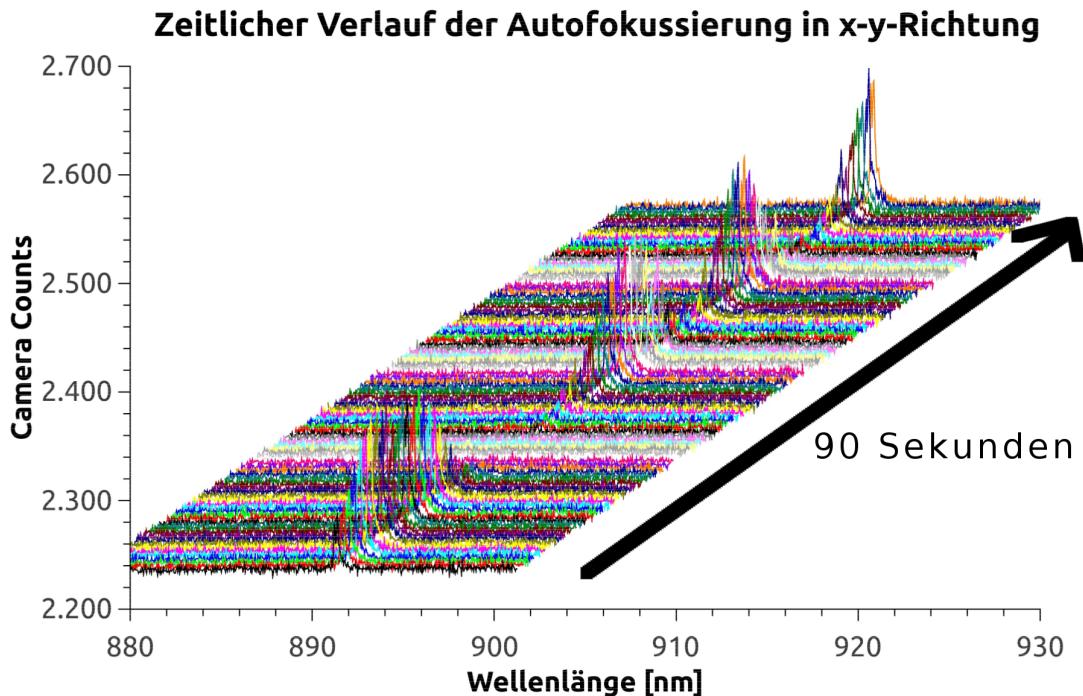


Abbildung 4.6: Wasserfall-Diagramm des zeitlichen Verlaufes der x - y -Autofokussierung. Zwischen dem ersten und letzten Graphen liegen 90 Sekunden. Die Aufnahmen entstanden bei einer Pumpleistung von 13 Milliwatt und zeigen die Entwicklung des Signals in der Zeit bei laufender Autofokussierung. Es wurde das Signal bei 892 nm maximiert.

Die Effizienz der Algorithmen ist schwer abzuschätzen, weil sie u.a. stark von der Signalstärke des Quantenpunktes abhängt. Jedoch wurde beim Testen des Aufbaus festgestellt, dass bei mehrmaligem Durchlauf der Algorithmen eine Positionskorrektur stattfindet bis das Maximum gefunden wurde. Aus diesem Grund beeinträchtigt ein nicht-erfolgreicher Durchlauf der Autofokussierung nicht den Messablauf, da die Autofokussierung solange hintereinander ausgeführt werden kann, bis das Signal die maximale Stärke erreicht hat.

Kapitel 5

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Programm *QDSearch* um eine 3-Achsen-Autofokussierung erweitert. Diese steuert sowohl den Fokus des konfokalen Mikroskops als auch die Position der Probe im Kryostaten zuverlässig und schnell, so dass das Messsignal maximiert wird. Damit wurde eine Stabilisierung des Messaufbaus für Langzeitmessungen ermöglicht. Das Programm verfügt nun über die Fähigkeit die Probenposition und den Fokus selbstständig im Verlauf einer Messung zu optimieren.

Zusätzlich wurde das Programm um eine Möglichkeit erweitert die Auslesesoftware von *QDSearch* auf einen Laser zu kalibrieren, so dass über die Achsen verlässliche Aussagen über das Emissionsspektrum der Quantenpunkte gemacht werden können. Das Programm wurde weiterhin so modifiziert, dass einzelne Bestandteile des Aufbaus ohne großen Aufwand ausgetauscht werden können ohne die Software umschreiben zu müssen.

Literaturverzeichnis

- [1] CCD System Considerations. (2014), Janu-
ary. [http://www.andor.com/learning-academy/
ccd-system-considerations-what-to-consider-before-buying-a-ccd](http://www.andor.com/learning-academy/ccd-system-considerations-what-to-consider-before-buying-a-ccd)
- [2] BENNET, C.H. ; BRASSARD, G.: Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing* 175–179 (1984)
- [3] BIMBARD, Erwand ; BODDEDA, Rajiv u. a.: Homodyne tomography of a single photon retrieved on demand from a cavity-enhanced cold atom memory. In: *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014), Februar. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.033601>. – DOI 10.1103/PhysRevLett.112.033601
- [4] EKBERT, Hering ; ROLF, Martin: *Photonik - Grundlagen Technologie und Anwendung*. 1. Aufl. Springer-Verlag, 2006. – 133–134 S. – ISBN 3–540–23438–1
- [5] KROH, Tim: Charakterisierung von Quantenpunkt-Einzelphotonen Für Quantenrepeater-Anwendungen. (2012)
- [6] MADSEN, K.H. u. a.: Efficient out-coupling of high-purity single photons from a coherent quantum dot in a photonic-crystal cavity. In: *arXiv* 1402.6967v1 (2014)
- [7] MESCHEDE, Dieter: *Optik, Licht und Laser*. 3., durchgesehene Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008. – 159–161 S. – ISBN 978–3–8351–0143–2
- [8] MÜLLER, Chris: Automation of an optical setup for investigation of quantum dots. (2013)
- [9] NIEGEL, Smart (editor): Yearly Report on Algorithms and Keysizes. (2011), S. 30
- [10] RASTELLI, A. u. a.: Controlling quantum dot emission by integration of semicon- ductor nanomembranes onto piezoelectric actuators. In: *Physica Status Solidi B* 249(4):687 (2012)
- [11] REIDER, Georg A.: *Photonik - Eine Einführung in die Grundlagen*. 2., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wien : SpringerWienNewYork, 2005. – 360–361 S. – ISBN 3–211–21901–3
- [12] SCULLY, M. O. ; ZUBAIRY, M. S.: *Quantum Optics*. Cambridge University Press, 1997
- [13] STEUDLE, Gesine A.: *Detection of Quantum States of Light*. 1. Aufl. Lola Books GbR, 2012. – ISBN 978–3–944203–00–3
- [14] WOOTERS, W.K. ; ZUREK, W.H.: A Single Quantum cannot be Cloned. In: *Physical Status Solidi B* 299 (1982), S. 802–803
- [15] ZINTH, Wolfgang ; ZINTH, Ursula: *Optik – Lichtstrahlen - Wellen - Photonen*. 1. Aufl. München D-81671 : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2005. – 255–261 S. – ISBN 3–486–27580–1

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
<i>APD</i>	Lawinen-Photo-Diode (engl. avalanche photo diode)
<i>GUI</i>	Grafische Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface)
<i>HBT</i>	Hanbury-Brown-Twiss-Aufbau
<i>HS</i>	Hohlspiegel
<i>HSS</i>	horizontale Auslesegeschwindigkeit (engl. horizontal shift speed)
<i>LB</i>	Lochblende
<i>PMT</i>	Photoelektronen-Vervielfacher-Röhren (engl. photo multiplier tubes)
<i>QP</i>	Quantenpunkt
<i>SBF</i>	Schmalbandfilter
<i>VSS</i>	vertikale Auslesegeschwindigkeit (engl. vertical shift speed)

Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Oliver Benson, dass ich diese Bachelorarbeit in der, von ihm geleiteten, AG Nanooptik erstellen durfte.

Besonderer Dank geht an Otto Dietz, für seine Betreuung und Unterstützung. Durch ihn wurde diese Arbeit möglich. Er hat mich sowohl beim Programmieren selbst, als auch beim Schreiben der Arbeit mit sehr hilfreichen Ratschlägen versorgt. Sein Wissen und seine Leidenschaft zu guten und simplen Lösungen haben mich inspiriert.

Tim Kroh und Thomas Kreissl möchte ich herzlich danken für die gemeinsamen Laborstunden, in denen mir Einiges über den Aufbau des Experimentes und die physikalischen Hintergründe erklärt wurde. Sie standen mir immer mit einem offenen Ohr und guten Anmerkungen im Verlauf meiner Arbeit zur Verfügung. Sie hatten die Ideen, wie durch das Programm die Arbeit auf das Wesentliche reduziert werden konnte.

Ich bedanke mich bei allen Mitgliedern der AG Nanooptik, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben und für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt haben.

Meiner Familie, die vom Anfang bis zum Ende dieser Arbeit für mich da war, danke ich sehr.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit allein und nur unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 16. März 2014

Unterschrift