



fachschaft physik
tu dortmund

**Gedächtnisprotokoll
Fortgeschrittenenpraktikum (Master)**

Prüfende: Prof. Betz und Frau Landmann

GEPRÜFT IM JANUAR 2026

NOTE: 1,0

Meine Versuche:

1. **V42 Scanning tunneling microscopy**
2. V29 Quantum key distribution (BB84 protocol and decoy states)
3. V58 Modulation and demodulation
4. V64 Interferometry
5. **V22 Quantum Optics**

1 Prüfungsfragen

Die Fragen während der Prüfung gingen ausschließlich von Herrn Betz aus. Frau Landmann hat während der Prüfung nur protokolliert und nichts selbst gefragt.

1.1 Lieblingsversuch - V22 Quantenoptik

Betz: Mit welchem Versuch möchten Sie denn anfangen?

Ich: V22 - Quantenoptik.

Betz: Den Versuch kenne ich nicht gut. Erzählen Sie mir doch mal, was man da so macht.

Ich: *Erzähle über den Nachweis der Quantisierung für Photonen und dass man dies grundlegend mithilfe einer Einzelphotonenquelle und eines polarisierenden Strahlteilers macht.* Klassisch würde sich die Intensität immer halbieren, bei Einzelphotonen kann das Photon nur an einem Ausgang des Strahlteilers gemessen werden. Zur Quantifizierung nutzt man $g^{(2)}(0)$. *Ich fange kurz an darüber zu erzählen, bspw. dass man bei Einzelphotonen $g^{(2)}(0) = 0$ erwartet.*

Betz: Wie ist $g^{(2)}(0)$ denn überhaupt definiert?

Ich: *Schreibe diese Formel auf:*

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

Betz: Ja, das haben Sie jetzt geschickt gewählt. Nicht falsch verstehen, die Formel ist auch richtig, aber daran kann man jetzt nicht so leicht erklären, was ...

Ich: Man kann $g^{(2)}(0)$ natürlich auch mit Intensitäten ausdrücken (*bzw. im Experiment mit Raten, aber das habe ich in dem Moment nicht gesagt; wahrscheinlich wollte er stattdessen eine Formel mit den Koinzidenzraten sehen*). *Ich habe dann noch etwas mehr über Photonbunching und Antibunching, Koinzidenzfenster (5 ns im Experiment) usw. gesprochen, ohne eine andere Formel für $g^{(2)}(0)$ aufschreiben zu müssen.*

Betz: Wie sieht denn die Einzelphotonenquelle in Ihrem Versuch aus?

Ich: *Erstmal haben wir keine; ich zeichne den Versuchsaufbau auf mit BBO, Strahlteiler, und Detektoren A, B und C.*

Betz: Welche Wellenlänge nutzen Sie denn?

Ich: 405 nm. Also blaues Licht.

Betz: Sie haben da jetzt einen BBO-Kristall gezeichnet. Also ein nichtlineares optisches Medium, was genau macht der denn?

Ich: Er erzeugt Photonpaare, die dann auf die beiden "Arme" aufgeteilt werden und gleichzeitig detektiert werden sollten.

Betz: Welche Wellenlänge haben denn die Photonen aus dem BBO-Kristall?

Ich: Das sind 810 nm, also die halbe Energie.

Betz: Okay, die Photonen des BBOs müssen aber nicht unbedingt die halbe Energie haben, sondern können sich auch unterscheiden.

Ich: Laut Anleitung war dies hier aber der Fall mit 810 nm.

Betz: Sie haben da jetzt zwei Strahlgänge mit einem Winkel eingezeichnet. Warum ist das so?

Ich: Das liegt an der Impulserhaltung.

Betz: Ja, genau. Okay, Sie haben jetzt noch etwas mehr als den BBO gezeichnet. Was ist das und was machen Sie damit?

Ich: A, B und T sind Detektoren. Im ersten Versuchsteil bestimmt man erstmal die Koinzidenzen von T und A, um zu überprüfen, ob wirklich Photonpaare erzeugt werden. Man erwartet wegen der Photonpaare eine Koinzidenzrate $g^{(2)}(0) \gg 1$. Wir sind dann bei $g^{(2)}(0) \approx 170$ rausgekommen...

Betz: 170? Das ist aber sehr hoch! Na gut, das hängt letztendlich wahrscheinlich von der Normierung ab... Jedenfalls soll sie größer als 1 sein. Was machen Sie danach?

Ich: Dann misst man die Koinzidenzen von A und B und stellt fest, dass $g^{(2)}(0) = 1$ statt 0. Das liegt hier daran, dass man nicht wirklich eine Einzelphotonenquelle sondern Mehrphotonenpulse hat, die dementsprechend immer noch auf beide Detektoren aufgeteilt werden können. Das Ganze kann man lösen durch den dritten Detektor T, den man als Trigger verwendet. Wenn dieser ein Photon detektiert, sollte sich idealerweise zum gleichen Zeitpunkt ein Photon bei A oder B befinden. Das Ganze hat auch den Vorteil, dass Dreifachkoinzidenzen bestimmt werden, die für Einzelphotonen ja eigentlich nicht auftreten sollten und dann eher auf Umgebungslicht und andere Fehler zurückzuführen sind. Sie sind seltener als zufällige Doppelkoinzidenzen.

Betz: Alles klar. Wissen Sie denn, welche Detektoren verwendet werden?

Ich: Ja, das sind die Avalanche-Photodioden. Sie haben eine p-i-n Schicht mit einem starken E-Feld. Wenn dort durch den Photoeffekt ein Elektron-Loch-Paar erzeugt wird, werden die Ladungen so stark beschleunigt, dass sie Atome ionisieren können. Das Ganze verstärkt sich dann immer weiter und kann dann gemessen werden, deswegen auch der Begriff Avalanche. *(Ich hatte die Funktionsweise von APDs vor der Prüfung nur überflogen und konnte das nur grob wiedergeben. Ein wirkliches Verständnis habe ich nicht und hätte auch nicht weiter drauf eingehen können, wenn Herr Betz noch tiefergehender gefragt hätte.)*

Betz: Ja, also ganz ähnlich wie das Geiger-Müller-Zählrohr, das Sie aus der Teilchenphysik kennen. Das ist dann sozusagen das Analogon in der Festkörperphysik.

Betz: Sie haben ja nicht wirklich eine Einzelphotonenquelle in Ihrem Experiment. Was könnte man denn als "richtige" Einzelphotonenquelle verwenden? Das müssen Sie jetzt nicht wissen.

Ich: *Ich hatte grob darüber gelesen und erzählte etwas von Übergängen in einzelnen Atomen/Moleküle und schließlich von Quantenpunkten, da unterbrach mich Herr Betz schon.*

Betz: Ja, genau Quantenpunkte. Quantenpunkte emittieren aber in der Regel auch keine Einzelphotonen sondern mehrere, bspw. 5. Wie kann man daraus dennoch eine Einzelphotonenquelle machen? Wodurch unterscheiden sie sich?

Ich: Vielleicht durch Polarisierung?

Betz: Ja, das auch, aber zum Filtern verwendet man eine andere Eigenschaft.

Ich: Also die Frequenz?

Betz: Ja, genau. Das lässt sich ja recht einfach durch entsprechende Filter realisieren.

1.2 Zweiter Versuch - V42 Rastertunnelmikroskopie

Betz: Okay schauen wir uns mal die STM an. Was haben Sie da gemacht?

Ich: Wir haben Bilder von Gold und die Kristallstruktur von HOPG analysiert...

Betz: Ja, davon haben Sie Bilder gemacht, aber wie funktioniert STM denn überhaupt?

Ich: Das hat natürlich mit dem Tunneleffekt zu tun. *Ich zeichne eine Skizze mit einem Potential und einer Wellefunktion ein, die im Potential exponentiell abfällt und nachher mit geringerer Amplitude schwingt.* Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit nimmt mit der Potentialdicke exponentiell ab. In unserem Fall ist die Potentialbarriere die Lücke zwischen Spitze und Probe.

Betz: Wovon hängt der Tunnelstrom denn ab? Die Exponentialfunktion haben Sie ja schon erwähnt.

Ich: *Ich schreibe auf*

$$I \propto \exp(-\alpha d)$$

Sie hängt auch von der Spannung ab.

Betz: Ja, schon, aber ich möchte auf etwas anderes hinaus. Was ist denn das α in Ihrer Gleichung?

Ich: Da war noch eine Konstante und eine Arbeit drin; ich weiß gerade nicht welche...

Betz: Arbeit würde ich nicht sagen, sondern Energie.

Ich: Die benötigte Energie, damit Elektronen tunneln können?

Betz: So ungefähr. Es ist natürlich die Differenz aus kinetischer Energie und Potentialbarriere. *(Hätte ich natürlich aus Physics 101 wissen müssen, aber ich bin in dem Moment nicht drauf gekommen)*

Betz: Welches Material verwenden Sie denn für die Spitze?

Ich: Wir haben Platin-Iridium verwendet.

Betz: Was ist bei der Spitze wichtig?

Ich: Die Spitze sollte einerseits natürlich leitfähig sein und möglichst einatomig, damit die Elektronen wirklich nur dorthin tunneln.

Betz: In welcher Größenordnung liegen denn üblicherweise die Tunnelströme?

Ich: Sie sind auf jeden Fall ziemlich klein. Vielleicht im Nanoamperebereich?

Betz: Üblicherweise sogar im Pikoamperebereich. Aber Ströme im Nanoamperebereich kommen durchaus auch vor. Aus welchem Material bestehen denn Piezokristalle?

Ich: Das weiß ich nicht, ich kenne nur ein paar Anwendungen. Bspw. in Feuerzeugen oder beim Ultraschall.

Betz: Die Frage ist eher, welches Material nicht piezoelektrisch ist. (Er erzählte dann irgendwas über GaAs). Was technisch in Ihrem Aufbau verwendet wird weiß ich auch nicht, wahrscheinlich irgendwelche Keramiken. In welcher Größenordnung liegen denn die verwendeten Spannungen bei Piezokristallen?

Ich: *Ich wusste kein Größenordnung und sagte, dass das auf die Anwendung ankommt.* Idealerweise skaliert die Ausdehnung des Kristalls ja linear mit der Spannung, auch wenn das in Wirklichkeit nicht ganz linear ist.

Betz: Da gibt es natürlich ein paar Nichtlinearitäten durch Hysterese, Defekte, usw. Aber in welcher Größenordnung liegen die Spannungen denn nun? Sie können da nicht groß falsch tippen.

Ich: Im Voltbereich?

Betz: Ja, oft sogar um die 100 V, aber das hängt von der Anwendung ab. Voltbereich stimmt ungefähr.

Betz: Ich weiß nicht, ob Sie das verwendet haben, aber man kann die Position der Spitze bestimmen.

Ich: Verwendet haben wir das im Experiment nicht.

Betz: Mit welchen Methoden könnte man sie denn bestimmen?

Ich: Zum Beispiel mit optischen Methoden-

Betz: Und wie funktioniert das? Sie haben das ja auch in einem anderen Versuch gemacht...

Ich: Also man verwendet die Reflexion der Spitze und ... *(welche Versuche hatte ich nochmal? :D)* ... achja, nutzt dann Interferometrie.

Betz: Genau! Alles klar. Sie kriegen eine 1,0.

2 Note und Fazit

2.1 Note

Herr Betz teilte mir direkt nach der letzten Frage meine Note (1,0) mit, ohne dass ich den Raum verlassen musste.

2.2 Fazit

Herr Betz hat bereits zu Beginn der Prüfung angemerkt, dass ich eine recht außergewöhnliche Auswahl an Versuchen hatte (meine Praktikumpartnerin und ich hatten im Bachelor unterschiedliche Gruppen und hatten dadurch den Großteil der üblichen Versuche nicht mehr im Master zur Verfügung). Dementsprechend konnte ich beim Quantenoptik-Versuch, der noch recht neu ist und den er nicht so gut kennt, etwas freier erzählen und wurde nicht, wie sonst bei Herrn Betz üblich, nach jedem halben Satz unterbrochen. Wem so etwas lieber ist, kann in der Prüfung extra einen Versuch auswählen, der nicht zu Herrn Betz' Lieblingsversuchen zählt. Für den zweiten Versuch wusste ich, dass sehr wahrscheinlich STM oder Interferometrie drankommen, da man zu den anderen Versuchen teilweise schlecht Fragen stellen kann oder da Herr Betz sie wahrscheinlich nicht kennt. Das kann man bei der Prüfungsvorbereitung natürlich auch berücksichtigen und die entsprechenden Versuche tiefergehender lernen.

Generell fragt Herr Betz gerne zu Größenordnungen, auch zu welchen, die nicht in der Anleitung stehen und die man (wie gesehen) in der Auswertung nicht nutzt. Darauf kann man sich natürlich nochmal extra vorbereiten, aber dass ich bei manchen Fragen (v.a. zu STM) eine kleine Hilfestellung brauchte und dass ich bei manchen Größenordnungen raten musste, war im Endeffekt nicht ausschlaggebend für die Endnote. Ich denke, man kann da also ganz entspannt drangehen.