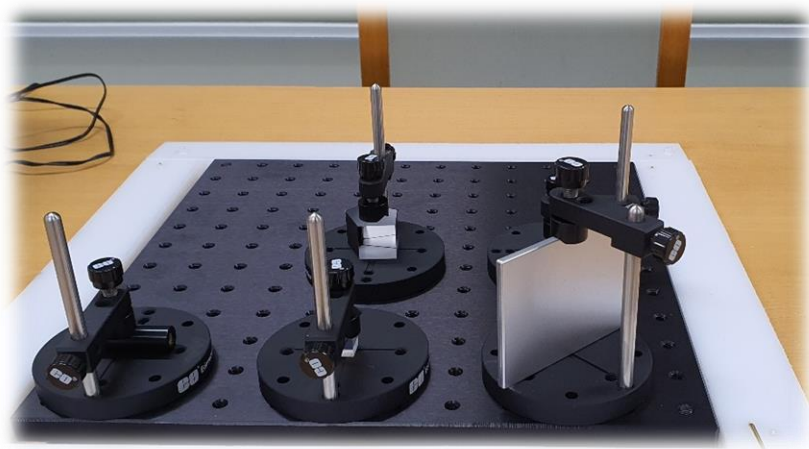




Exemplarische Untersuchung eines Quantencomputers-Demonstrators



Langfassung

eingereicht von den Teilnehmern

Philipp Schöneberg (18) und Phil Gustke (18)

Projektbetreuer: Dr. Hans-Otto Carmesin

Erarbeitungsort: Gymnasium Athenaeum Stade

Bundesland: Niedersachsen

Wettbewerbsjahr: 2023

Wettbewerbssparte: Jugend forscht

Fachgebiet: Physik

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
1. Einleitung	3
2. Funktionsweise eines Quantencomputers	3
2.1. Darstellung von Informationen.....	3
2.1.1. Superposition.....	3
2.2. Verarbeitung von Informationen	3
2.3. Grundlegende Abbildungen.....	3
2.3.1. Hadamard-Abbildung.....	3
2.3.2. Phasenverschiebung	3
2.3.3. Controlled-NOT-Abbildung (CNOT-Abbildung)	3
3. Umsetzung im Versuchsaufbau	4
3.1. Genereller Versuchsaufbau.....	4
3.2. Funktionsweise der Materialien.....	4
3.2.1. Laser.....	4
3.2.2. Polarisierende Beamsplitter.....	4
3.2.3. Spiegel.....	4
3.2.4. Pentaprisma	4
3.2.5. Detektor.....	4
3.2.6. Polarisatoren.....	4
3.2.7. Generelle Funktionalität	4
3.3. Test der Materialien.....	5
3.3.1. Laser.....	5
3.3.2. Polarisierender Beamsplitter	5
3.3.3. Spiegel.....	5
3.3.4. Pentaprisma	5
5. CNOT-Experiment	5
5.1. Lineare Polarisation.....	5
5.2. Zirkulare Polarisation	6
5.3. Orbital Angular Momentum (OAM)	6
5.4. Ovalförmige Asymmetrie der Wellenfront.....	6
5.5. Finale Umsetzung der CNOT-Abbildung.....	6
6. Ergebnisse	6
7. Ergebnisdiskussion	6
8. Fotos	7
9. Glossar	15
10. Literatur	17
11. Danksagungen	17

Kurzfassung

In unserem Projekt geht es um die Untersuchung eines Quantencomputers. Hierzu haben wir einen experimentellen, auf Licht basierenden Quantencomputer-Demonstrator mit 2 Qubits gebaut und erfolgreich getestet. Wir führen verschiedene Experimente durch und entwickeln ein tieferes Verständnis von Verschränkung und Quantencomputern.

1. Einleitung

In unserem Projekt geht es darum, den Aufbau und die Funktionsweise eines Quantencomputers zu verstehen und genauer zu untersuchen. Dies ist von besonderem Interesse, aufgrund seiner vielversprechenden Datenverarbeitung im Vergleich zu herkömmlichen Computern (siehe 2.). Hierbei haben wir uns dazu entschieden, mit einem auf Licht basierenden Quantencomputer-Demonstrator zu arbeiten. Diese Entscheidung basieren wir auf den Vorteilen, die Licht mit sich bringt. So bietet es aufgrund seiner Geschwindigkeit und Bandbreite eine enorm hohe Datenübertragungsrate und zusätzlich sind dessen Quanteneigenschaften aufgrund der Normalität seines Wesens bereits gut erforscht und es stehen viele fundierte Informationen zur Verfügung. Zu Beginn haben wir die hochwertigen und sorgfältig gewählten Optikmaterialien, die zum Bau nötig waren, einzeln auf ihre Funktion überprüft und getestet. Anschließend nahmen wir den Bau des Quantencomputer-Demonstrators vor und fokussierten den Laser über alle beteiligten, genau montierten und örtlich dokumentierten Elemente, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Danach überprüften und bewerteten wir verschiedene Quanteneigenschaften des Lichtes auf Nutzbarkeit als Qubits und testeten mithilfe dieser verschiedene Gatter.

2. Funktionsweise eines Quantencomputers

2.1. Darstellung von Informationen

2.1.1. Superposition

Im Gegensatz zu einem klassischen Computer werden in Quantencomputern Informationen nicht als boolsche Variablen, also in Bit dargestellt, sondern als Wellenfunktion ψ , also in Qubit. Ein Qubit verfällt nach seiner Messung ebenfalls in einen von zwei möglichen Werten. Grundsätzlich besteht es aber aus zwei Basiswellenfunktionen (Carmesin, *Quantencomputer*, S. 1), kann jedoch auch als Linearkombination dieser Basiszustände dargestellt werden (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 7) und kann so folglich unendlich viele Werte annehmen. Dieser Zustand der Linearkombination nennt sich Superposition und kann auch als Zustand im Hilbertraum dargestellt werden.

2.1.2. Verschränkungen

Eine weitere zentrale Eigenschaft, die bei der Darstellung von Informationen in Quantencomputern entscheidend ist, heißt Verschränkung. Diese sagt grundsätzlich aus, dass die Wahrscheinlichkeiten, mit denen Messwerte in einem System aus mindestens zwei verschränkten Qubits vorgefunden werden, in irgendeiner Form voneinander abhängig sind. Die Wahrscheinlichkeiten und Wellenfunktionen lassen sich nicht einfach faktorisieren, sondern müssen als ein System betrachtet werden. Die daraus folgende Korrelation der Messwerte von verschränkten Qubits ist ortsunabhängig (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 10).

2.2. Verarbeitung von Informationen

Die Art der Verarbeitung dieser Informationen erfolgt durch unitäre Abbildungen (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 7). Diese Operationen besitzen eine hohe Informationsdichte, da sie sich in hohen Dimensionen um viele Achsen sehr fein einstellen lassen, im Gegensatz zu einem klassischen Computer, der mit logischen Abbildungen arbeitet (Carmesin, *Quantencomputer*, S. 1).

2.3. Grundlegende Abbildungen

Die verschiedenen Operationen (siehe 2.2.) lassen sich durch wenige grundlegende unitäre Abbildungen effizient beschreiben. (Lopes, *Experimental realization of quantum CNOT gate*, S.1). Die bekanntesten sind hier die Hadamard-Abbildung und die Controlled-NOT-Abbildung (CNOT-Abbildung) sowie die Phasenverschiebung.

2.3.1. Hadamard-Abbildung

Die Hadamard-Abbildung ist dafür zuständig, ein Qubit in eine spezifische Superposition zu versetzen (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 8). Es kann, je nach Genauigkeit, so eingestellt werden, dass es jede Linearkombination der Basiswerte darstellen kann.

2.3.2. Phasenverschiebung

Die Phasenverschiebung kann in verschiedenen Variationen genutzt werden und ist grundsätzlich dafür zuständig, den Zustand eines Qubits im Hilbertraum um einen bestimmten Winkel, um eine bestimmte Achse zu rotieren. Im kartesischen Koordinatensystem würden die Wellenfunktionen von ausgewählten Qubits eines Systems in X-Richtung verschoben werden. Dies beeinflusst das Messergebnis nur, wenn nicht das gesamte System um denselben Wert verschoben wird (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 6f), da sich so kein neues Interferenzmuster bildet.

2.3.3. Controlled-NOT-Abbildung (CNOT-Abbildung)

Die CNOT-Abbildung benötigt ein System aus mindestens zwei Qubits und ist dafür zuständig, diese auf einem bestimmten Weg zu verschränken. Kontrolliert durch den Zustand des ersten Qubits, wird der Zustand, des zweiten

entweder invertiert oder unverändert weitergeleitet. Eine beispielhafte, mathematische Umsetzung mit den Qubits ψ_I und ψ_{II} sowie den Zuständen 0 und 1 sieht somit folgendermaßen aus (Die beiden Wellenfunktionen können hierbei auch im gleichen Lichtstrahl realisiert sein):

$$\text{CNOT}(\psi_{0,I} \psi_{0,II}) = \psi_{0,I} \psi_{0,II}$$

$$\text{CNOT}(\psi_{0,I} \psi_{1,II}) = \psi_{0,I} \psi_{1,II}$$

$$\text{CNOT}(\psi_{1,I} \psi_{0,II}) = \psi_{1,I} \psi_{1,II}$$

$$\text{CNOT}(\psi_{1,I} \psi_{1,II}) = \psi_{1,I} \psi_{0,II}$$

(Carmesin, *Quantencomputer*, S.2)

3. Umsetzung im Versuchsaufbau

3.1. Unser Versuchsaufbau

Unser Versuchsaufbau besteht aus fünf verschiedenen Hauptkomponenten, welche auf einer Steckplatte mit passenden Halterungen in Form eines erweiterten Mach-Zehnder-Interferometers montiert sind (Lopes, *Experimental realization of quantum CNOT gate*, S.1). So nutzen wir einen Laser, zwei polarisierende Beamsplitter, einen Spiegel, ein Pentaprisma sowie einen Detektor (siehe Abb. 1). Des Weiteren kann der Detektor, bestehend aus einer matten Oberfläche, durch eine vorgeschaltete Streulinse erweitert werden, um leichte Veränderungen am Laserstrahl zu verdeutlichen. Außerdem nutzen wir Polarisatoren.

3.2. Funktionsweise der Materialien

3.2.1. Laser

Die Funktion des Lasers besteht darin, einen monochromatischen, möglichst gerichteten Laserstrahl auszusenden.

3.2.2. Polarisierende Beamsplitter

Die polarisierenden Beamsplitter dienen dazu, den Lichtstrahl basierend auf seiner Polarisation entweder zu reflektieren oder zu transmittieren. In diesem Fall sollen sie, vertikal, linear polarisierte Lichtwellen reflektieren und horizontal, linear polarisierte transmittieren. Wichtig hierbei ist, dass der enthaltene halbdurchlässige Spiegel im 45-Grad-Winkel zum Laser beziehungsweise zum Detektor steht (siehe Abb. 1, 2) sowie, dass invertierbare Quanteneigenschaften des Lichtes bei einer Reflexion invertiert werden. Dies stellt jedoch trotz der Wichtigkeit einiger dieser Quanteneigenschaften für die Funktionsweise unseres Quantencomputer-Demonstrators kein Problem dar, da im Versuchsaufbau zwei dieser polarisierenden Beamsplitter verbaut sind und sich die erste Inversion durch die zweite wieder umkehrt. Daher kann diese Eigenschaft bei Versuchen und Beobachtungen ignoriert werden.

3.2.3. Spiegel

Der gewöhnliche Spiegel dient daraufhin der Reflexion der auf ihn treffenden Lichtwellen und der Inversion ihrer Wellenfront.

3.2.4. Pentaprisma

Das Pentaprisma nutzt ebenfalls die gleiche Funktion der Inversion, allerdings findet diese im Prisma zweimal statt und schafft somit eine Richtungsänderung, ohne eine Veränderung der Wellenfront herbeizuführen (siehe Abb. 3).

3.2.5. Detektor

Der Detektor dient als indirekte Lichtreflexion und somit der Beobachtung des Laserstrahls. Die mögliche Erweiterung durch vorgestellte Streulinse weitet den Strahl auf, um kleinere Lichtdifferenzen und weitere Unterschiede besser erkennbar zu machen.

3.2.6. Polarisatoren

Polarisatoren transmittieren ausschließlich eine Polarisationsrichtung. Es gibt sowohl lineare Polarisatoren als auch zirkulare.

3.2.7. Generelle Funktionalität

Bei Kombination aller Elemente (siehe Abb. 4) lassen sich die einzelnen Funktionen in einen deutlichen Nutzenkontext bringen. So wird der vom Laser gebildete Laserstrahl nach dem Auftreffen auf den polarisierenden Beamsplitter anhand seiner Polarisation und der daraus folgenden Transmission oder Reflexion auf zwei verschiedene Wege aufgeteilt. Anschließend trifft der Strahl entweder auf den Spiegel oder das Pentaprisma, wodurch invertierbare Eigenschaften entweder invertiert oder durch doppelte Inversion unverändert zum zweiten polarisierenden Beamsplitter geleitet werden. Hierdurch ist ein Schalter entstanden, der durch eine durch lineare Polarisatoren erfolgende Polarisation zwischen dem Laser und dem ersten Beamsplitter geschaltet werden kann. Durch diese Funktion der Veränderung der ersten Quanteneigenschaft der Polarisation und den daraus

resultierenden Auswirkungen auf die zweite Eigenschaft durch mögliche Inversion, entsteht eine Verschränkung beider Qubits. Anschließend werden die beiden vorher aufgetrennten Laserstrahlen durch den zweiten Beamsplitter wieder zusammengeführt und auf den Detektor weitergeleitet.

3.3. Test der Materialien

Um die Funktionalität der Komponenten sicherzustellen, testeten wir diese sorgfältig auf ihre Funktionsweise.

3.3.1. Laser

Zum Testen des Lasers aktivierten wir diesen und erweitern den Detektor durch die Streulinse. So ist es uns möglich auch geringere Asymmetrien und Fehler des Lasers zu verstärken und somit zu erkennen. Dabei erkannten wir, dass dieser keinen ausschließlich punktuellen Lichtstrahl erzeugt, sondern eine ovalförmige Struktur (siehe Abb. 5). Da unsere Experimente hierdurch nicht negativ beeinflusst werden, akzeptierten wir diesen Defekt.

3.3.2. Polarisierender Beamsplitter

Die polarisierenden Beamsplitter testeten wir durch Polarisation des eingehenden Laserstrahls mit jeweils einem der beiden verschiedenen Polarisatoren und der Beobachtung, wie sich das Licht anschließend verhält. Erhalten wir nach dem Eingang von vertikal, linear polarisiertem Licht ausschließlich einen reflektierten Laserstrahl und nach Eingang eines horizontal, linear polarisierten Laserstrahls, einen transmittierten, dann ist deutlich, dass der Beamsplitter seine Funktionalität des Aufteilens des Laserstrahls anhand seiner Polarisation erfüllt. Sollte hingegen bei einem der beiden Versuche keiner der beiden Strahlen, der Verkehrte oder beiden sichtbar sein, ist klar, dass der Beamsplitter defekt ist. Beim Ausführen dieser Tests erhielten wir jedoch abgesehen von vernachlässigbaren Ungenauigkeiten ausschließlich positive Ergebnisse (siehe Abb. 6 - 9).

3.3.3. Spiegel

Den Spiegel testeten wir anhand der beim Test des Lasers erkannten Asymmetrie von dessen Laserstrahl. Sollte die Orientierung der vor dem Spiegel diagonal gerichteten ovalförmigen Struktur des Laserstrahls anschließend invertiert sein, erfüllt der Spiegel seinen Zweck. In unserem Versuch konnten wir eine Invertierung feststellen und somit die Funktionalität bestätigen (siehe Abb. 10 & 11).

3.3.4. Pentaprisma

Das Pentaprisma testeten wir ähnlich wie den Spiegel anhand eines Vergleichs der Asymmetrie des Laserstrahls vor und nach dem Eintreffen auf dieses. Jedoch ist der Erwartungswert hierbei eine gleichbleibende Form, welche wir auch erhielten (siehe Abbildung 12 & 13).

4. Umsetzung der Hadamard-Abbildung

Das Hadamard-Gatter haben wir mithilfe eines einfachen, linearen Polarisators umgesetzt. Die quantenphysikalische Eigenschaft der linearen Polarisation des Lichts lässt sich durch die Rotation des Polarisators nicht nur horizontal oder vertikal polarisieren, sondern auch in einen Mischzustand, also eine Superposition, versetzen. So würde beispielsweise bei einer 45°-Drehung des Polarisators eine Superposition entstehen, in der die Photonen sich in einem Zwischenzustand zwischen horizontal und vertikal linearer Polarisation befinden. Schließlich verfallen sie bei der Messung bzw. Aufteilung der Photonen nach Polarisation im Beamsplitter zu gleichen Wahrscheinlichkeiten in einen der beiden Zustände, wodurch auf der Abbildung der lineare und der horizontale Strahl die gleiche Helligkeit besitzen (siehe Abb.14 - 17). Damit haben wir ein funktionierendes Hadamard-Gatter erfolgreich demonstriert.

5. CNOT-Experiment

Für die Auswahl der Qubits werden bei dem CNOT-Gatter mit unserem Aufbau zwei verschiedene Quanteneigenschaften von Licht benötigt, die in einem Laserstrahl kombiniert werden können, um diese Qubits auf möglichst einfache Art und Weise miteinander verschränken zu können. Hierbei haben wir die lineare Polarisation als kontrollierendes Qubit sowie die zirkuläre Polarisation, das Orbital Angular Momentum (OAM) und eine Asymmetrie der Wellenfront also kontrolliertes Qubit in Betracht gezogen.

5.1. Lineare Polarisation

Bei der linearen Polarisation handelt es sich um die horizontale oder vertikale Ausrichtung der Lichtwellen. Die Photonen mit der jeweiligen linearen Polarisation können durch sogenannte Polarisatoren absorbiert werden, sodass sie aktiv kontrolliert werden kann. Diese Polarisation nutzen wir in jeder Version des CNOT-Experimentes dieser Arbeit als das kontrollierende Qubit des Gatters. Außerdem ist es eine häufig genutzte Variante, ein Qubit in einem auf Licht basierenden Quantencomputer darzustellen (Lopes, *Experimental realization of quantum CNOT gate*, S.1) (Hey, *Quantum computing: an introduction*, S. 5f)

5.2. Zirkulare Polarisation

Bei der zirkularen Polarisation hingegen handelt es sich um die Drehrichtung der Photonen, wenn diese sich in einer zirkular drehenden Welle fortbewegen. Diese kann sich entweder mit oder gegen den Uhrzeigersinn, in Impulsrichtung bewegen. Um diese Quanteneigenschaft als vom ersten Qubit kontrolliertes Qubit einzusetzen, versuchten wir mit zirkularen Polarisatoren eine der beiden Drehrichtungen zu absorbieren, während die andere transmittiert würde. Anschließend würde nach Schaltung des Lichtweges durch lineare Polarisatoren und den ersten polarisierenden Beamsplitter die zirkulare Polarisation entweder am Spiegel invertiert oder am Pentaprisma gleichgelassen werden. Jedoch schlug dieser Versuch fehl, da wir bei einem Test feststellten, dass die zirkularen Polarisatoren auch die lineare Polarisation und somit Schaltung des Experiments beeinflussten (siehe Abb. 18 & 19).

5.3. Orbital Angular Momentum (OAM)

Eine mehrfach angewendete Möglichkeit zur Umsetzung des kontrollierten Qubits ist das Orbital Angular Momentum (Lopes, *Experimental realization of quantum CNOT gate*, S.1). Hierbei handelt es sich um die Struktur der Wellenfront, welche zum Beispiel über ein computergeneriertes Hologramm helixförmig verändert werden kann (Padgett, *The angular momentum of light*, S. 3). Diese Verformung der Wellenfront kann als Qubit mit den möglichen Werten einer helixförmigen und einer flachen Wellenfront verwendet werden, ohne dass sich das OAM und die lineare Polarisation ungewollt beeinflussen. Dennoch haben wir uns aus Gründen des Materialmangels gegen diese Lösung entschieden.

5.4. Ovalförmige Asymmetrie der Wellenfront

Die hier verwendete Asymmetrie der Wellenfront ist aufgrund von Ungenauigkeiten des verwendeten Lasers aufgetreten (siehe 3.3.1.) und stellt eine leicht ovale Form dar (siehe Abb. 5). Dieses Oval kann durch Drehung des Lasers oder Inversion durch ein Dove-Prisma unter anderem diagonal, nach rechts oben zeigend oder nach links oben zeigend eingestellt werden. Das ist relevant, weil diese Zustände vom Spiegel invertiert werden können, beziehungsweise durch die doppelte Spiegelung im Pentaprisma wieder in ihre Ausgangslage zurückversetzt und dementsprechend unbeeinflusst reflektiert werden können (siehe Abb. 12 & 13). So können wir diese Asymmetrie also als kontrolliertes Qubit mit den Werten nach links oben zeigend und nach rechts oben zeigend für unseren Quantencomputer-Demonstrator nutzen. Dies ist eine neue Möglichkeit dieses Qubit darzustellen, da im wissenschaftlichen Konsens das OAM als kontrolliertes Qubit verbreitet ist.

5.5. Finale Umsetzung der CNOT-Abbildung

Aufgrund der vorhergegangenen Aspekte haben wir uns schließlich für die lineare Polarisation in Kombination mit einer Asymmetrie der Wellenfront entschieden.

Um das Schaltverhalten der CNOT-Abbildung abzubilden stellen wir eine vollständig horizontal lineare Polarisation als $\psi_{0,I}$ und eine vollständig vertikal lineare als $\psi_{1,I}$ dar. Genauso, wie eine nach rechts oben zeigende Ausrichtung der Wellenfront mit $\psi_{0,II}$ und die nach links oben zeigende mit $\psi_{1,II}$. Nach der Eingabe der entsprechenden Werte durch lineare Polarisatoren und entsprechende Drehung des Lasers, konnten wir die theoretischen Ergebnisse (siehe 2.3.2. & Abb. 5, 20 - 24), bestätigen, womit die grundlegende Funktion des CNOT-Gatters erfolgreich demonstriert wurde.

6. Ergebnisse

Wir haben also mit dieser Arbeit die Grundlagen zum Verständnis von Quantencomputern gelegt, sowie den Aufbau eines Hadamard- und eines CNOT-Gatters erklärt und dessen Funktion experimentell, mithilfe eines Demonstrators, nachgewiesen. Zusätzlich wurden verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung des zweiten, kontrollierten Qubits geprüft und bewertet. Weiterhin wurde mit der Asymmetrie der Wellenfront eine neue, noch einfachere Demonstrationsmöglichkeit für dieses Qubit entdeckt.

7. Ergebnisdiskussion

Kritisch zu betrachten ist allerdings die weitere Umsetzung der Asymmetrie der Wellenfront, da noch weiter erforscht werden muss, um zu sagen, ob sie sich in Zukunft tatsächlich in Quantencomputern durchsetzen kann. Die Möglichkeit zur Reduktion dieses Versuchsaufbaus auf ein einzelnes Photon halten wir zum Beispiel für unwahrscheinlich. Trotzdem sind die Grenzen des Versuchsaufbaus noch lange nicht ausgeschöpft. So lässt sich beispielsweise durch Hinzufügen eines Elementes, durch welches sich einer der beiden, bereits aufgeteilten Teile des Lichtes bewegt, wie ein Phasenplättchen oder eine Verzögerungsplatte, eine Phasenverschiebung herstellen. Dies geschieht, indem das Licht verlangsamt wird und dadurch eine Interferenz der beiden, aufgeteilten Lichtstrahlen erzeugt wird. Damit können alle essenziellen unitären Abbildungen und sogar Algorithmen, wie

beispielsweise der Grover-Algorithmus, mit diesem Versuchsaufbau als Grundlage, experimentell hergestellt werden und einen Quantencomputer praktisch demonstrieren.

8. Fotos

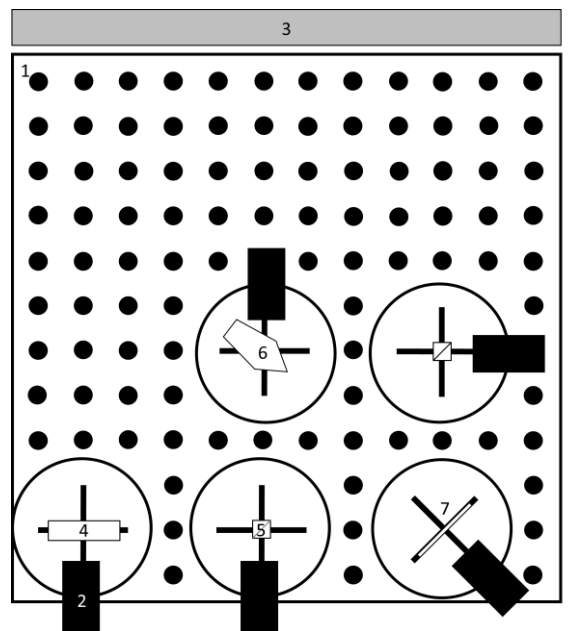


Abbildung 1: Der Versuchsaufbau: 1 Steckplatte, 2 Halterung, 3 Detektor, 4 Laser, 5 polarisierender Beamsplitter, 6 Pentaprisma, 7 Spiegel.

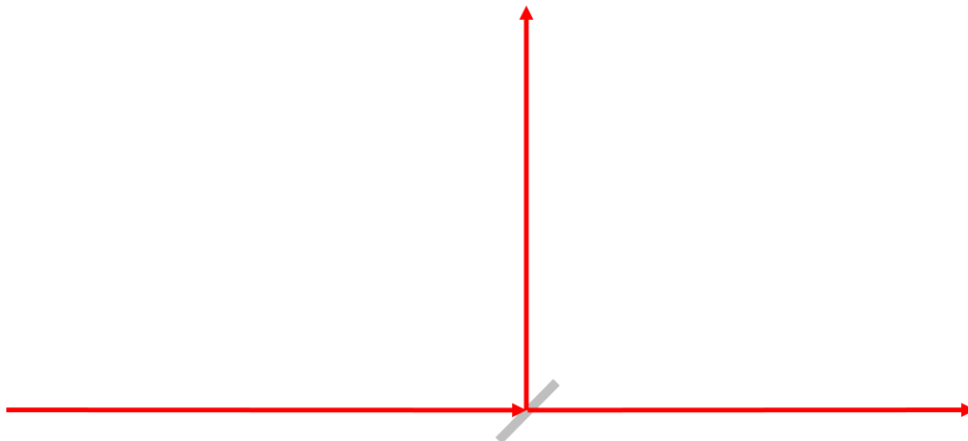


Abbildung 2: Funktion eines polarisierenden Beamsplitters. Dieser ist in Grau und das Licht in Rot dargestellt.

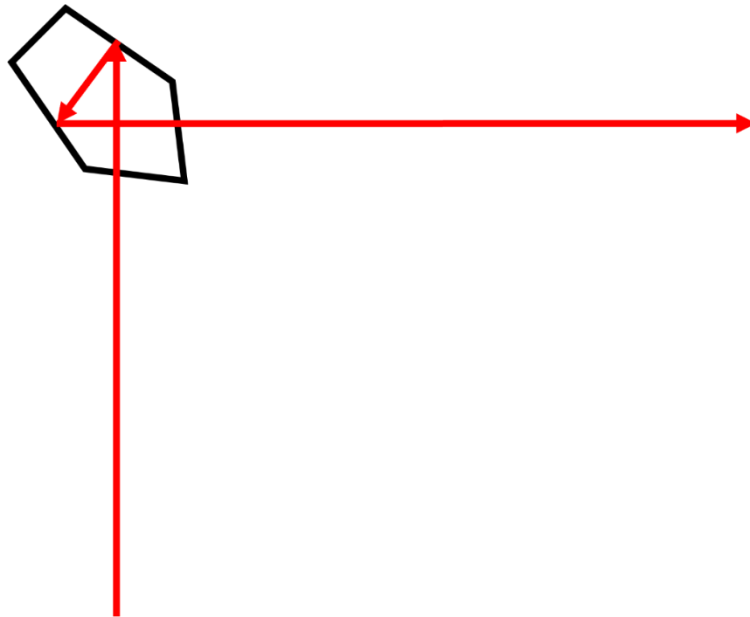


Abbildung 3: Funktion eines Pentaprismas. Dieses ist in schwarzer Umrandung und das Licht in Rot dargestellt.

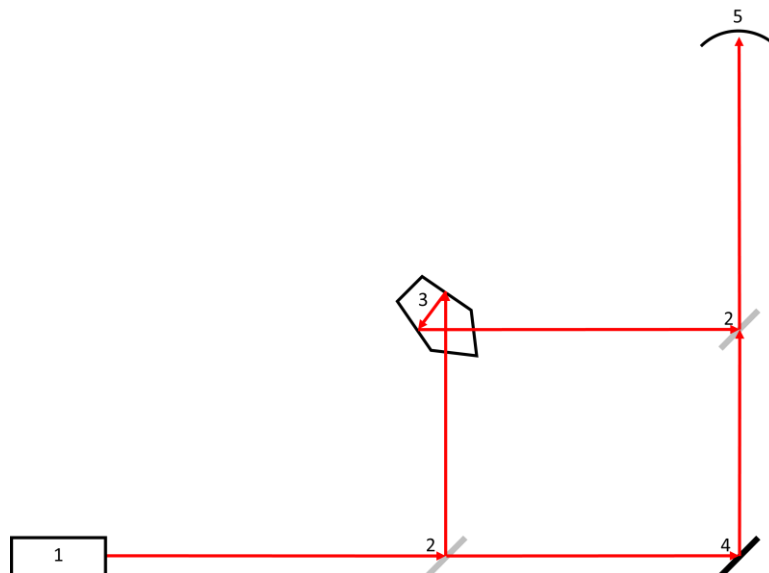


Abbildung 4: Kombination aller Elemente im Versuchsaufbau mit in Rot eingezeichneten Laserstrahl. Elemente: 1 Laser, 2 polarisierender Beamsplitter, 3 Pentaprisma, 4 Spiegel, 5 Detektor.

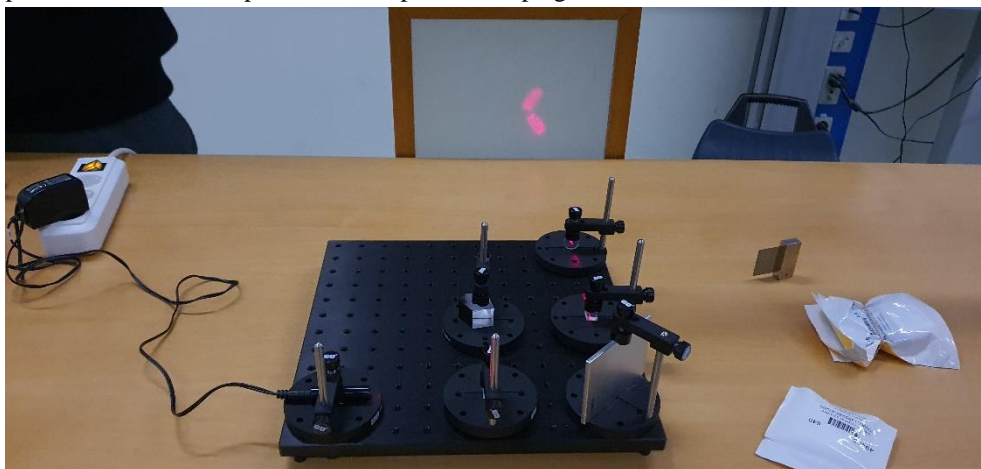


Abbildung 5: Versuchsaufbau mit aktiviertem Laser und Fokussierung der einzelnen Bauteile auf die Entstehung zweier Punkte durch zwei Lichtwege.

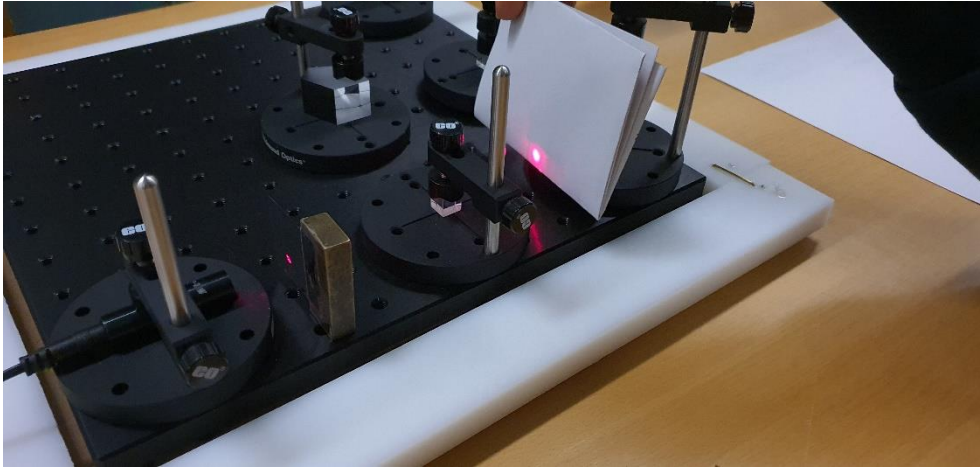


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear horizontalem Polarisator. Erkennbar ist, dass der polarisierende Beamsplitter den Laserstrahl transmittiert.

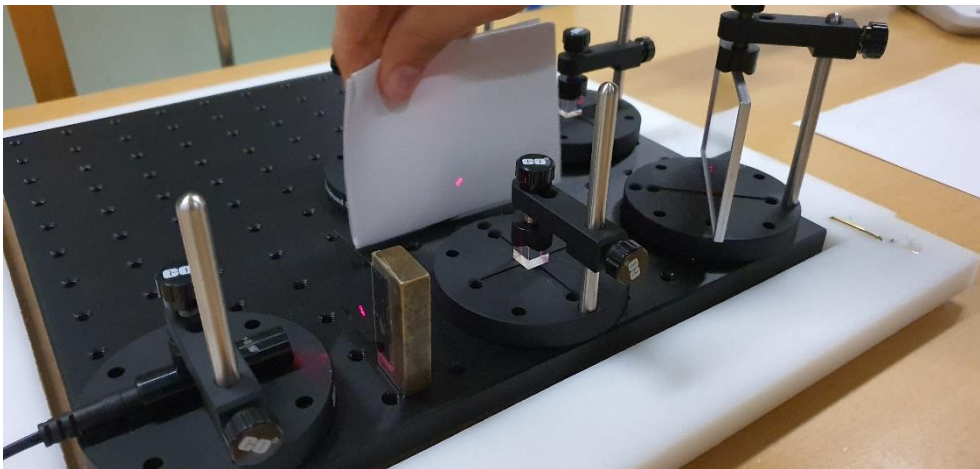


Abbildung 7: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear horizontalen Polarisator. Erkennbar ist, dass der polarisierende Beamsplitter den Laserstrahl kaum reflektiert.

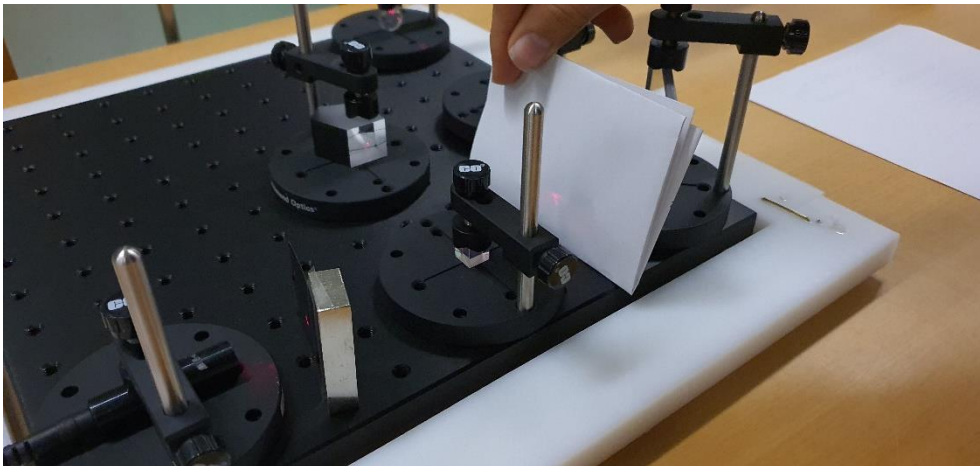


Abbildung 8: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear vertikalem Polarisator. Erkennbar ist, dass der polarisierende Beamsplitter den Laserstrahl kaum transmittiert.

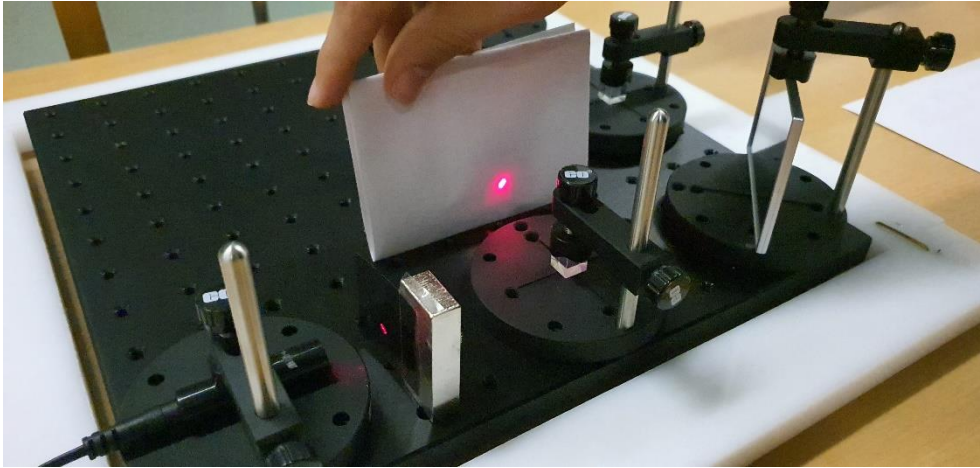


Abbildung 9: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear vertikalem Polarisator. Erkennbar ist, dass der polarisierende Beamsplitter den Laserstrahl reflektiert.

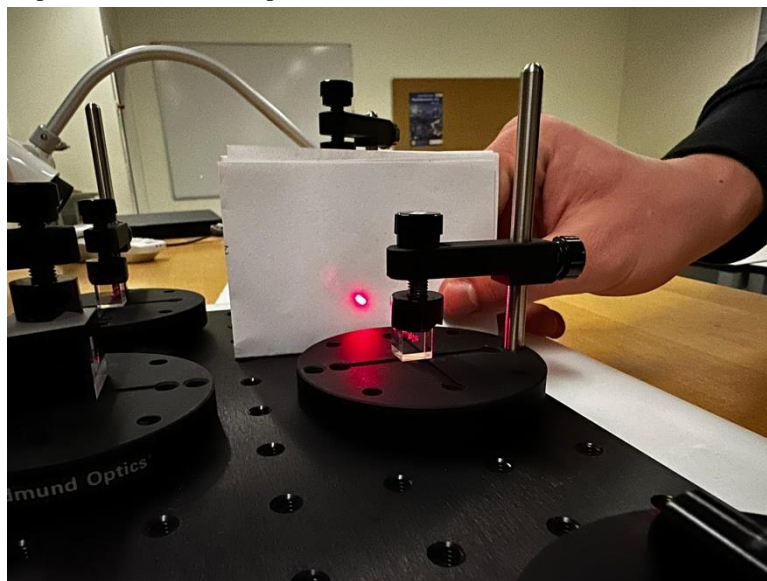


Abbildung 10: Versuchsaufbau mit aktivem Laser. Erkennbar ist, dass die ovalförmige Asymmetrie des Laserstrahls sich zwischen dem ersten polarisierenden Beamsplitter und dem Spiegel nach links oben orientiert.

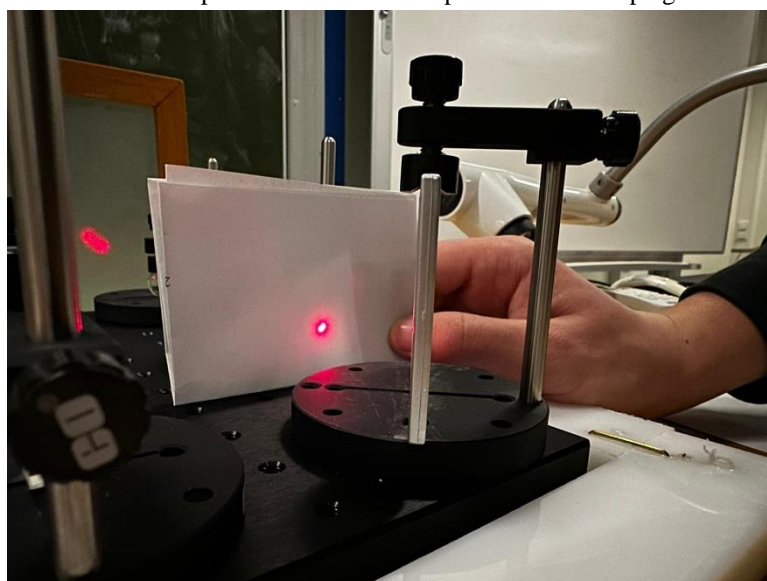


Abbildung 11: Versuchsaufbau mit aktivem Laser. Erkennbar ist, dass die ovalförmige Asymmetrie des Laserstrahls sich zwischen dem Spiegel und dem zweiten polarisierenden Beamsplitter nach rechts oben orientiert.

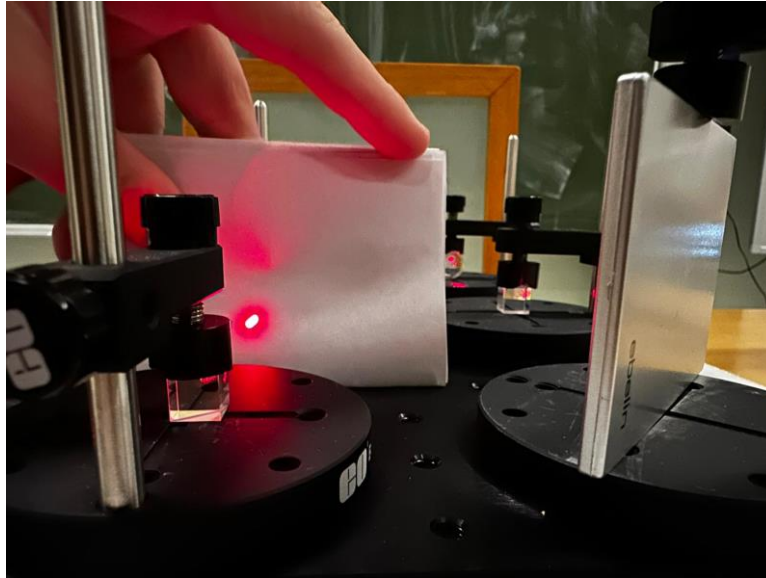


Abbildung 12: Versuchsaufbau mit aktivem Laser. Erkennbar ist, dass die ovalförmige Asymmetrie des Laserstrahls sich zwischen dem ersten polarisierenden Beamsplitter und dem Pentaprisma nach rechts oben orientiert.

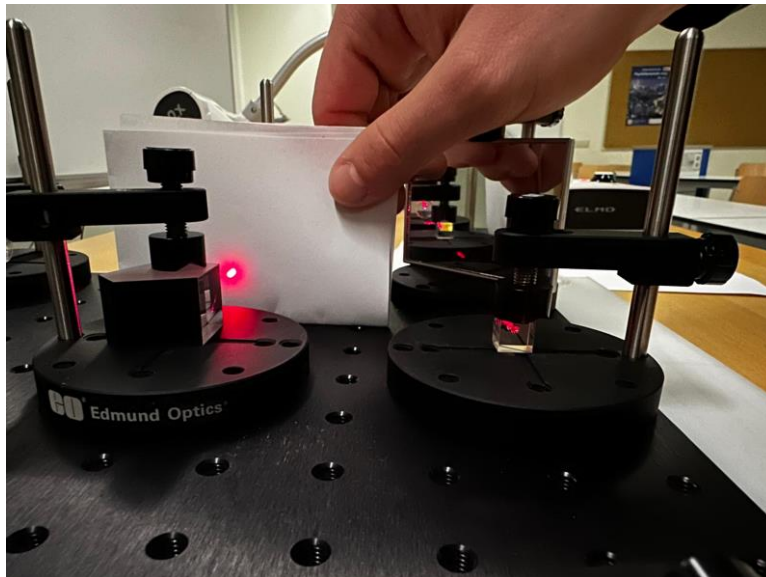


Abbildung 13: Versuchsaufbau mit aktivem Laser. Erkennbar ist, dass die ovalförmige Asymmetrie des Laserstrahls sich zwischen dem Pentaprisma und dem zweiten polarisierenden Beamsplitter nach rechts oben orientiert.

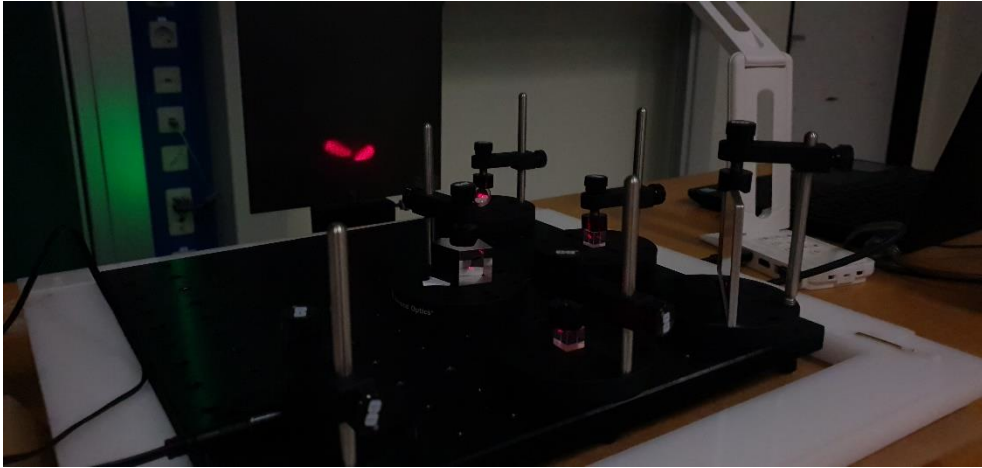


Abbildung 14: Versuchsaufbau mit aktivem Laser. Erkennbar ist, dass eine Aufteilung des Lasers, basierend auf der Polarisierung des Lasers vorgenommen wurde. Deutlich wird hierdurch, dass beide Polarisationsarten im eingehenden Laserstrahl vorhanden waren.

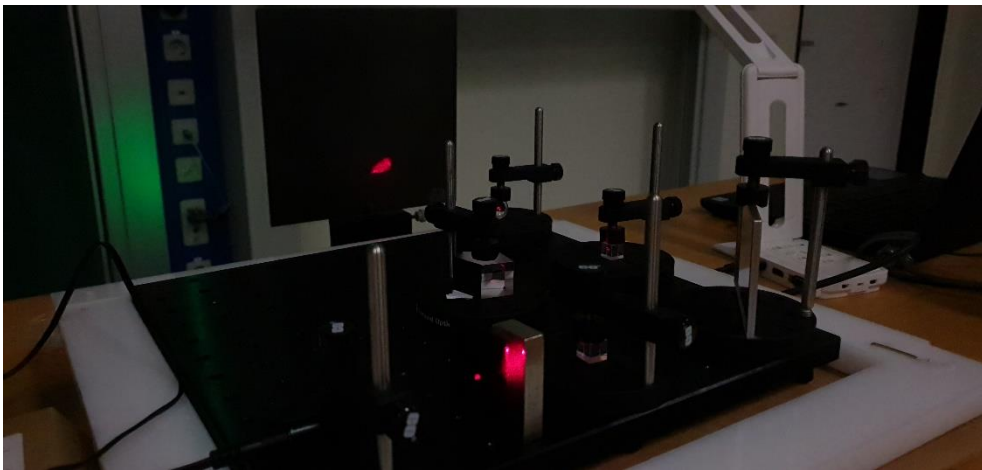


Abbildung 15: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und nachgeschaltetem, senkrecht stehenden Polarisator. Erkennbar ist, dass keine Aufteilung des Lasers, basierend auf der Polarisierung des Lasers vorgenommen wurde. Deutlich wird hierdurch, dass nur senkrecht polarisiertes Licht im eingehenden Laserstrahl vorhanden war.

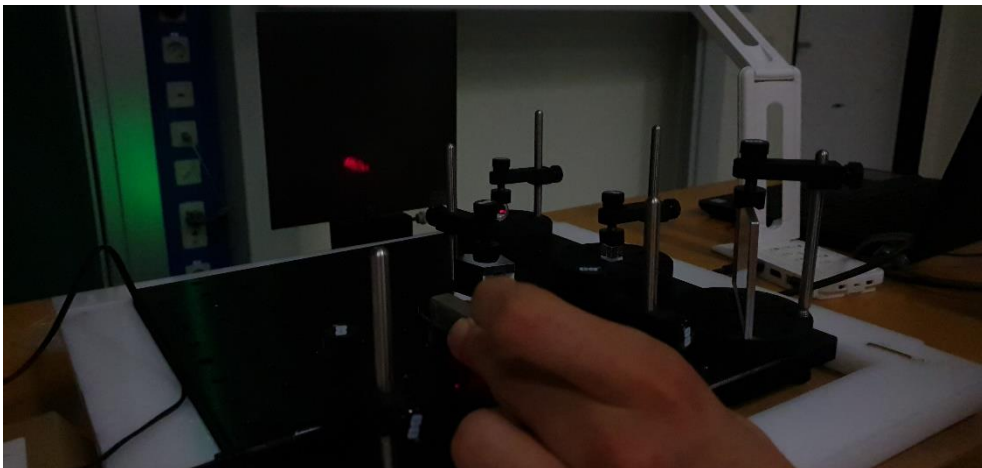


Abbildung 16: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und nachgeschaltetem, waagrecht gehaltenen Polarisator. Erkennbar ist, dass keine Aufteilung des Lasers, basierend auf der Polarisierung des Lasers vorgenommen wurde. Deutlich wird hierdurch, dass nur waagrecht polarisiertes Licht im eingehenden Laserstrahl vorhanden war.

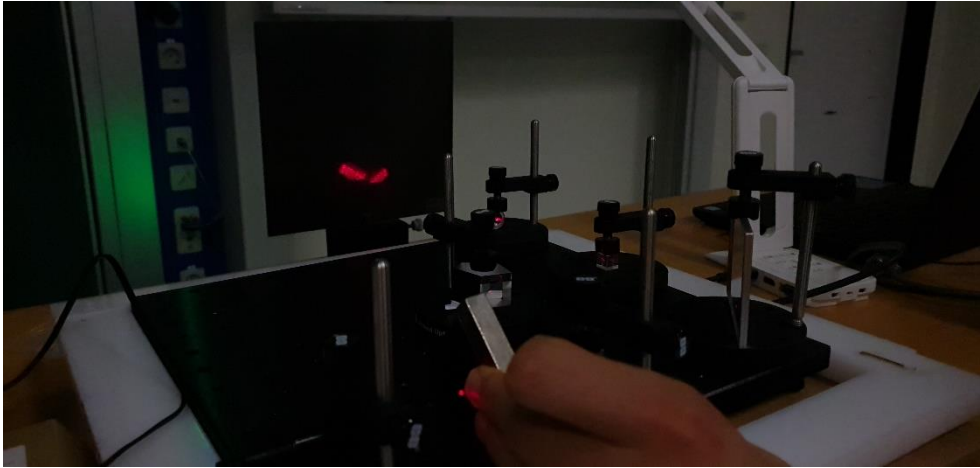


Abbildung 17: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und nachgeschaltetem, schräg gehaltenen Polarisator. Erkennbar ist, dass eine Aufteilung des Lasers, basierend auf der Polarisierung des Lasers vorgenommen wurde. Deutlich wird hierdurch, dass beide Polarisationsarten im eingehenden Laserstrahl vorhanden waren.

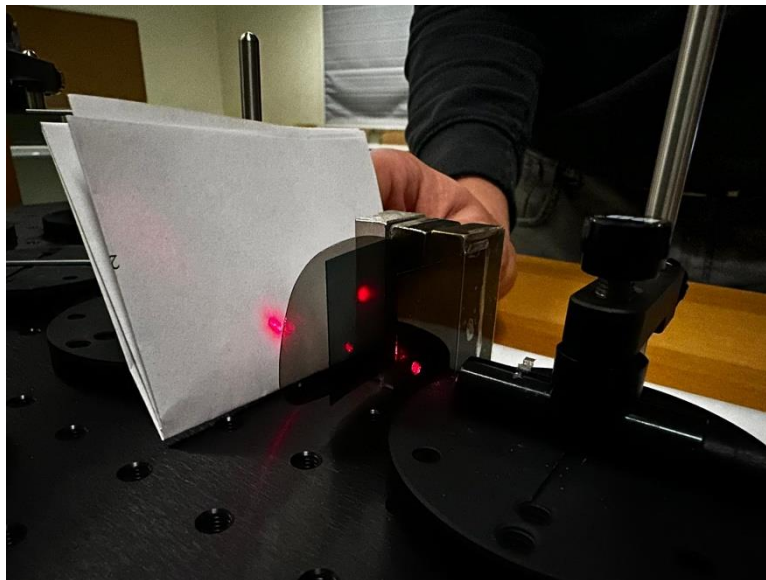


Abbildung 18: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear horizontalem, vertikalem sowie dazwischenliegenden zirkularem Polarisator. Erkennbar ist, dass der Laserstrahl kaum absorbiert wird.

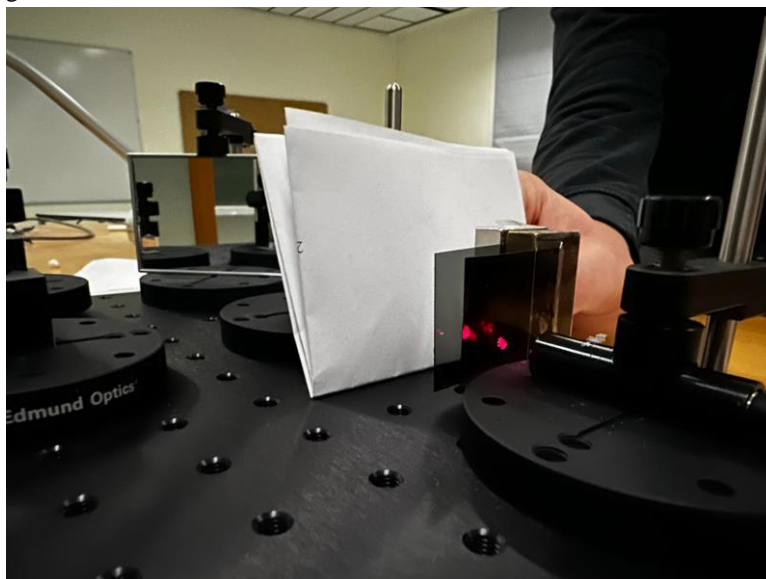


Abbildung 19: Versuchsaufbau mit aktivem Laser und direkt danach geschaltetem linear horizontalen sowie vertikalem Polarisator. Erkennbar ist, dass der Laserstrahl vollkommen absorbiert wird.

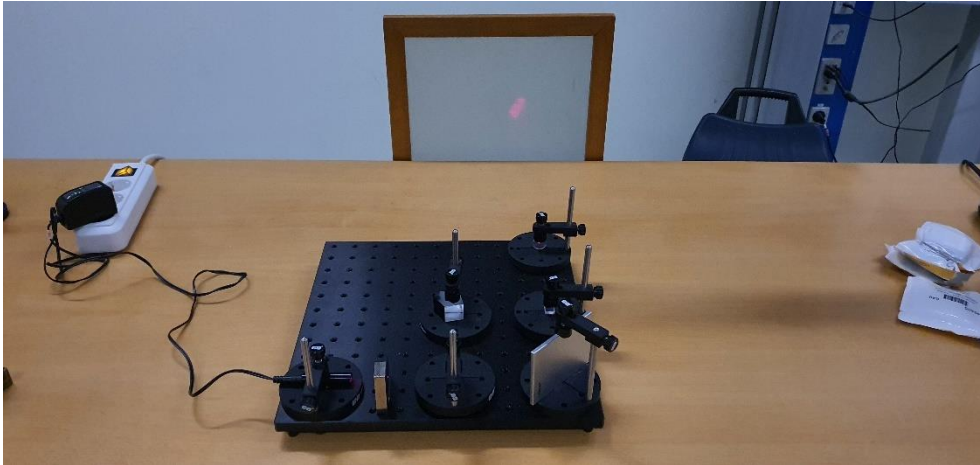


Abbildung 20: Versuchsaufbau mit aktivem Laser (Ausrichtung 1) und direkt danach geschaltetem vertikalem Polarisorator. Auf dem Detektor erkennbar ist, eine nach rechts oben orientierte Wellenfront.

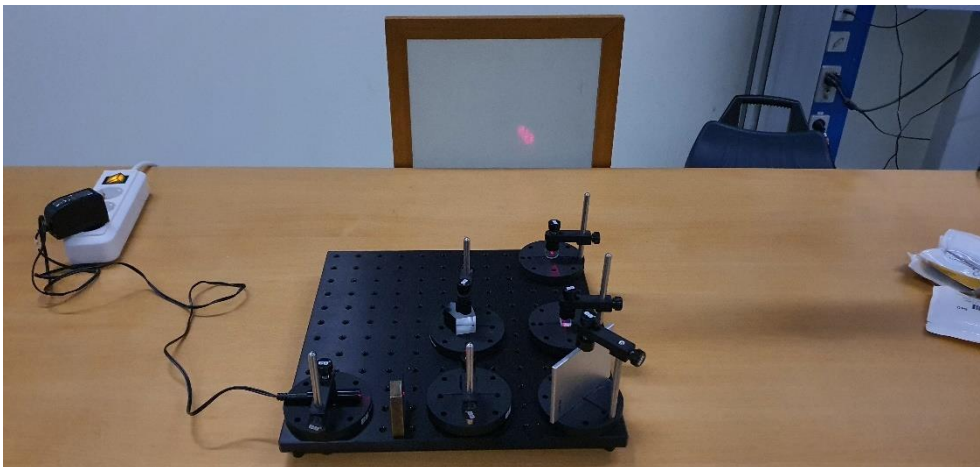


Abbildung 21: Versuchsaufbau mit aktivem Laser (Ausrichtung 1) und direkt danach geschaltetem horizontalem Polarisorator. Auf dem Detektor erkennbar ist, eine nach links oben orientierte Wellenfront.



Abbildung 22: Versuchsaufbau mit aktivem Laser (Ausrichtung 2) und direkt danach geschaltetem vertikalem Polarisorator. Auf dem Detektor erkennbar ist, eine nach links oben orientierte Wellenfront.



Abbildung 23: Versuchsaufbau mit aktivem Laser (Ausrichtung 2) und direkt danach geschaltetem horizontalem Polarisator. Auf dem Detektor erkennbar ist, eine nach rechts oben orientierte Wellenfront.

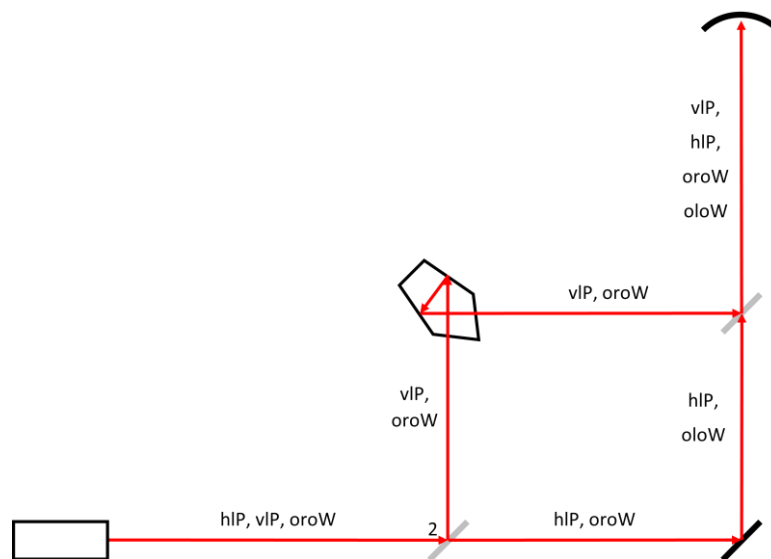


Abbildung 24: Kombination aller Elemente im Versuchsaufbau mit rot eingezeichnetem Laserstrahl. Zusätzlich notiert sind die lineare Polarisation des Laserstrahls sowie die Ausrichtung seiner ovalförmigen Asymmetrie zwischen den einzelnen Elementen. Hierbei bedeutet die Abkürzung hIP horizontal, lineare Polarisation; vIP, vertikal, lineare Polarisation; oloW, oben links orientierte Wellenfront und oroW, oben rechts orientierte Wellenfront.

9. Glossar

Abbildung

Eine Abbildung ist ein Synonym für eine Funktion. In unserem Fall betrachten wir ausschließlich Abbildungen, die sich auf die Verarbeitung von Qubits oder Bits beziehen.

Basis (Basiszustand, Basiswellenfunktion, Basiswert)

Die Anzahl der Basiswerte entspricht der kleinstmöglichen Menge an Werten, mit denen ein Vektorraum durch Linearkombination dargestellt werden kann. Die Summanden dieser Linearkombination ohne Faktor sind die Basiswerte.

Boolsche Variablen

Eine boolsche Variable kann nur zwei Werte, also 1 oder 0 beziehungsweise wahr oder falsch annehmen.

Dimension

Dimensionen sind eine Eigenschaft eines Vektorraums, hier des Hilbertraums. Die Anzahl der Dimensionen entspricht der Anzahl der Basisvektoren des Vektorraums. Der euklidische 3-Raum besitzt zum Beispiel die drei Dimensionen Länge, Breite und Höhe.

Dove-Prisma

Ein Dove-Prisma ist ein Prisma, welches einen Lichtstrahl spiegelt und damit die invertierbaren Quanteneigenschaften invertiert, ohne die Richtung des Strahls zu verändern.

Gatter

Ein Gatter ist die praktische Umsetzung einer Abbildung für einen Computer.

Hilbertraum

Der Hilbertraum ist ein Vektorraum mit Skalarprodukt für ein System aus Qubits, was bedeutet, dass er durch eine Linearkombination der Basiswellenfunktionen des Systems dargestellt werden kann. Ein Zustand im Hilbertraum ist also ein Vektor.

Interferenzmuster (Interferenz)

Das Interferenzmuster ist ein Muster, welches beim Zusammentreffen, also der Interferenz, verschiedener Wellen entsteht. Dies kann sowohl konstruktiv als auch destruktiv passieren. In unserem Fall würde dann Licht zu sehen beziehungsweise nicht zu sehen sein.

Linearkombination

Eine Linearkombination ist eine Summe von Werten mit jeweiligen variablen Faktoren, die den jeweiligen Wert skalieren. Sie stellt einen Vektorraum dar.

Logische Abbildung

Eine logische Abbildung stellt die Verarbeitung von in Bit dargestellten Informationen in einem klassischen Computer dar.

Polarisation

Lineare Polarisation: Siehe 4.1., Zirkulare Polarisation: Siehe 4.2.

Qubit

Ein Qubit ist eine Quanteneigenschaft mit zwei möglichen Basiszuständen, welches in eine Superposition dieser Zustände versetzt und verschränkt werden kann, mathematisch dargestellt mit einer Wellenfunktion ψ .

Quanteneigenschaft

Eine Quanteneigenschaft ist eine Eigenschaft, die bei Quanten, also sehr kleinen Teilchen, auftritt.

Unitäre Abbildung

Bei einer unitären Abbildung bleibt der Betrag, hier der Betrag der Wellenfunktion, konstant. Wenn wir die Abbildung also als Transformation eines Vektors im Hilbertraum beschreiben, kann dieser Vektor nur gedreht beziehungsweise gespiegelt werden, weil sich sonst der Betrag verändern würde.

Wellenfront

Die Wellenfront ist eine Fläche, auf welcher alle Punkte der Welle mit der gleichen Laufzeit, also der gleichen Phase, liegen.

10. Literatur

Carmesin, Hans-Otto; et al.: *Universum Physik Qualifikationsphase Nordrhein-Westfalen*. (Berlin: Verlag Cornelsen, voraussichtlich 2024)

Hey, Tony: *Quantum computing: an introduction*. In: Computing & Control Engineering Journal, 1999, H. 10, S. 105-112

Lopes, J. H.; Soares W. C.; Bernardo, Bertúlio de Lirna; Caetano, D. P.; Canabarro, Askery: *Experimental realization of quantum CNOT gate for orbital angular momentum and polarization with linear optical-elements*. In: arXiv:1807.06065, H. 1: 2018

Padgett, Miles John; Allen, Les: *The angular momentum of light: Optical spanners and the rotational frequency shift*. In: Optical and Quantum Electronics, 1999, H. 31, S. 1-12

11. Danksagungen

An dieser Stelle möchten wir uns herzlich bei der Anna und Claus Heinrich Siemens-Stiftung bedanken, welche durch ihre großzügige finanzielle Unterstützung dieses Projekt überhaupt erst möglich gemacht hat. Auch danken wir der Sparkasse für ihre Vermittlung zwischen uns und der Stiftung. Des Weiteren wollen wir uns bei unserem Lehrer und Mentor Herr Dr. Hans-Otto Carmesin für seinen aufschlussreichen Unterricht, sowie seine Unterstützung und seinen hilfreichen Rat bedanken. Außerdem danken wir unserem neuen Teammitglied Jannes Ruder, welcher unserem Team nach Anmeldeschluss beitrug, für seine tatkräftige Unterstützung.