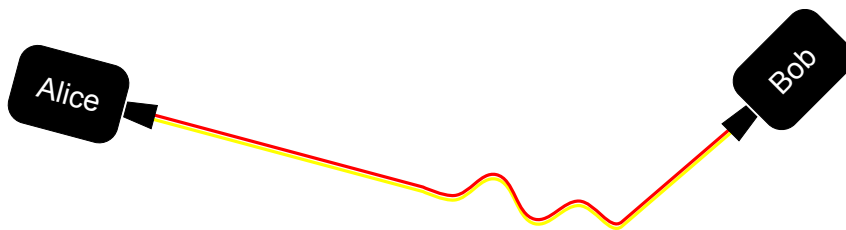


DEPARTMENT FÜR PHYSIK
LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Bachelorarbeit

Aufbau und Charakterisierung eines Laserausrichtungssystems in der Anwendung der Quantenkryptografie



Stefan Frick

28. Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Einzelkomponenten des Pointingsystems	3
2.1. Kurze Einführung in die Regelungstechnik	3
2.2. Quadrantendiode	4
2.3. Regler	9
2.4. Piezospiegel	10
2.4.1. Bandbreite	10
2.4.2. Ablenkwinkel	13
2.5. HV-Verstärker	16
3. Gesamtsystem	19
3.1. Frequenzabhängigkeit der Regelung im Gesamtsystem	19
3.2. Beacon-Leistungsabhängigkeit der Regelung im Gesamtsystem .	23
3.3. Das Gesamtsystem in der Anwendung QKD	28
4. Ausblick und Fazit	35
A. Versorgung der Quadrantendiode	37
B. Regler	39
C. Piezospiegel	41
D. Invertierende OP-Schaltung	43

1. Einleitung

Die moderne Quantenmechanik bietet ein breites Spektrum von neuen Anwendungen. Eine davon ist die Quantenkryptografie [1]. Diese bietet die Möglichkeit, Schlüssel zur sicheren Kommunikation zwischen zwei Punkten (z.B. mit dem sogenannten BB84 Protokoll [2]), auszutauschen und das theoretisch so, dass jedes Abhören des Schlüssels entdeckt und der Schlüssel somit nachbearbeitet oder verworfen werden kann. Dazu tauschen zwei optische Aufbauten, Alice und Bob genannt, einzelne Quanten aus. Bei der Freiraum-Quantenkryptografie geschieht dies mit Photonen, die durch die Atmosphäre der Erde gesendet werden. Im Fall des Aufbaus der Arbeitsgruppe Weinfurter an der LMU München [3][4] müssen die Photonen zwischen Alice und Bob eine Strecke von 500 m durch die Luft über der Innenstadt von München zurücklegen. Auf einem solchen Weg stoßen die Photonen auf viele Störungen. So können sie zum Beispiel durch Turbulenzen abgelenkt werden. Passiert dies in so großem Maße, dass die Photonen an Bob vorbei fliegen, so sind sie verloren, und können nicht mehr zum Austausch des Schlüssels zwischen Alice und Bob verwendet werden. Das kostet Effizienz und der Austausch von Schlüsseln bestimmter Größe dauert länger oder wird unmöglich.

Um den Verlust an Photonen zu minimieren, soll ein System aufgebaut werden, welches die Teleskope von Alice und Bob immer so ausrichtet, dass sie sich trotz Fluktuationen in der Atmosphäre immer direkt „anschauen“ (vgl. Abb. 1.1).

Bei einer solchen Aufgabe sind insgesamt vier Freiheitsgrade festzulegen, denn

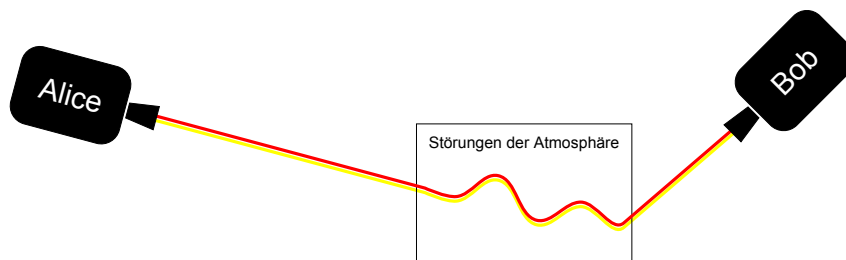


Abbildung 1.1.: Alice und Bob, beide so ausgerichtet, dass sie trotz Fluktuationen jeweils in den Beacon (rot und gelb) des anderen schauen.

jede Sichtlinie zwischen Alice und Bob ist durch ihren Winkel und Versatz bestimmt und das in vertikaler und horizontaler Richtung. Damit müssen zur Korrektur einer solchen Sichtlinie vier Freiheitsgrade zur Verfügung stehen. Dies geschieht mit Hilfe eines Pointingsystems (Ausrichtungssystems), dessen Grundidee auf einem sogenannten Beacon basiert. Ein Beacon ist ein helles „Leuchtfeuer“, das als Anhaltspunkt für die Ausrichtung der Module (Alice und Bob) dient, indem Alice und Bob sich einfach in Richtung des „Leuchtfeuers“ des jeweils anderen ausrichten. Das heißt Alice und Bob verändern ihren „Blickwinkel“ in horizontaler und vertikaler Richtung, korrigieren also je zwei Freiheitsgrade. Als Beacon genügt ein divergenter Laserstrahl, da der Beacon von Alice oder Bob nur bei dem jeweilig anderen zu sehen sein muss.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der Aufbau des Systems für ein Modul realisiert und getestet. Es standen also nur zwei Freiheitsgrade zur Verfügung. Dennoch lassen sich dadurch aussagekräftige Ergebnisse gewinnen, da die Aufgabenstellung „symmetrisch“ ist: Ein System, das dafür sorgt, dass Bob immer auf Alice ausgerichtet ist, sorgt, bei Alice eingesetzt, auch immer dafür, dass sie auf Bob ausgerichtet ist.

2. Einzelkomponenten des Pointingsystems

2.1. Kurze Einführung in die Regelungstechnik

Ziel dieser Arbeit ist es, ein System zu realisieren, welches bewerkstelligt, dass sich die Sichtlinien von Alice und Bob, wie in Kapitel 1 beschrieben, aufeinander ausrichten. Die dazu verwendeten einzelnen Komponenten bilden, was man in der Regelungstechnik einen Regelkreis (Abb. 2.1) nennt.

Ein Regelkreis besteht aus mehreren Teilen, beginnend mit der Regelgröße. Die Regelgröße ist eine physikalische Größe (z.B. Druck, Strom, Temperatur), welche von einer Messeinrichtung bestimmt und dann an die Regeleinrichtung geliefert wird. Ebenfalls an die Regeleinrichtung geliefert wird eine Führungsgröße, diese wird dem Regelkreis von außen zugeführt und von ihm nicht beeinflusst.

Die Aufgabe der Regeleinrichtung besteht nun darin, Regelgröße und Führungsgröße zu vergleichen, und daraus eine Stellgröße zu berechnen, welche geeignet ist die Regelstrecke zu steuern. Wird dann die Stellgröße an die Regelstrecke weitergegeben, so wird dadurch mindestens ein sogenanntes Stellglied (z.B. Ventil, Widerstand, Peltierelement) angesteuert. Dieses beeinflusst die Regelgröße nun so, dass sie sich der Führungsgröße annähert oder sich sogar mit ihr deckt.

Wird nun dem Regelkreis von außen eine Störgröße (z.B. Spannungsschwankungen, veränderte Außentemperatur) zugeführt, so wird auch diese von der Messeinrichtung registriert und als veränderte Regelgröße an die Regeleinrichtung weitergeleitet. Diese sorgt nun wiederum dafür, dass die Regelstrecke diese Störung wieder herausregelt. [5]

Hier entspricht der Winkel des einfallenden Beaconstrahls zur optischen Achse des Alice- oder Bobmoduls der Regelgröße. Eine Quadrantendiode liefert als Messeinrichtung diese Größe zu einem Regler, welcher zusammen mit zwei HV-Verstärkern die Regeleinrichtung bildet. Diese wiederum gibt die Stellgröße an einen Piezospiegel weiter, welcher nun den Strahl wieder so ablenkt, dass er

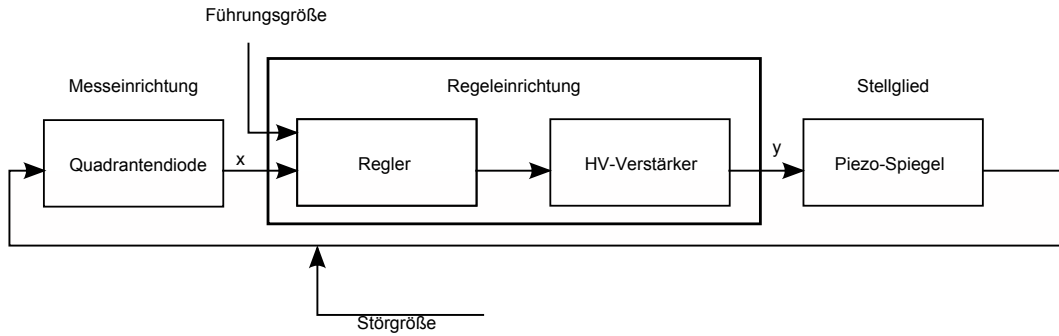


Abbildung 2.1.: Darstellung des Regelkreises. Die Regelgröße x wird von der Messeinrichtung erfasst und an die Regeleinrichtung geliefert. Diese vergleicht sie mit einer Führungsgröße um anschließend die Stellgröße y auszugeben, welche an die Regelstrecke übergeben wird. Von außen nehmen Störgrößen Einfluss auf das System.

parallel zur optischen Achse verläuft (Abb. 2.1). Störgrößen wären in diesem Fall Turbulenzen in der Atmosphäre, durch welche der Strahl abgelenkt wird. Da der Strahl die Quadrantendiode im Idealfall immer in der Mitte treffen sollte und diese dann eine Regelgröße von 0 V liefert, ist die Führungsgröße hier ebenfalls 0 V.

2.2. Quadrantendiode

Die Quadrantendiode besteht aus vier, als Quadranten eines Kreises angeordneten, Photodioden (vgl. Abb. 2.2). Werden die einzelnen Photodioden mit unterschiedlichen Leistungen beleuchtet, so entstehen unterschiedlich starke Ströme an den jeweiligen Dioden. Über diese Ströme lässt sich ein Signal erzeugen, welches die Lage des Beacon auf der Quadrantendiode wiedergibt. Dieses Signal besteht aus zwei Spannungen, V_{B-T} für das Verhältnis der Leistungen die unten und oben auftreffen und V_{L-R} für das Verhältnis der Leistungen links und rechts. Die Quadrantendiode QP50-6SD2 von Pacific Silicon Sensor Inc. [6] ist als ganzes Modul vorhanden und stellt die für die Erzeugung des Signals notwendige Elektronik bereit.

Da wie in Kapitel 1 beschrieben, Winkelfehler korrigiert werden sollen, ist es notwendig, vor der Quadrantendiode eine Linse anzubringen. Die Linse bildet alle zur optischen Achse parallelen Strahlen auf den Brennpunkt ab, während kollimierte Strahlen, die nicht parallel zur optischen Achse verlaufen, auf einen

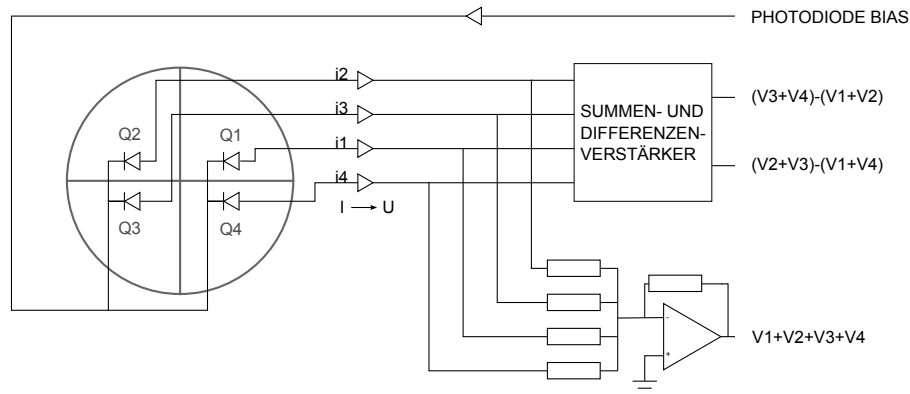


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Quadrantdiode mit den vier Quadranten Q1 bis Q4 und Blockdiagramm der Schaltung. [6]

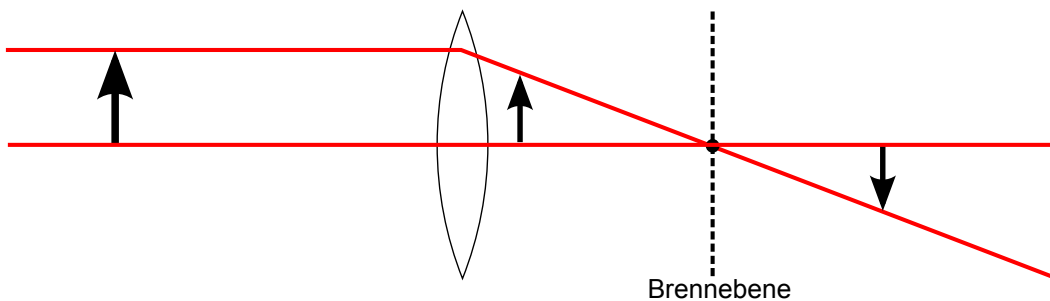


Abbildung 2.3.: Ursache der Regelfehler durch Bildumkehr, diese treten auf wenn die Quadrantdiode weiter als die Brennweite von der Linse entfernt wird.

anderen Ort abgebildet werden.

Stellt man die Quadrantdiode mit ihrem Zentrum in den Brennpunkt der Linse, so werden alle zur optischen Achse parallelen Strahlen auf die Mitte der Quadrantdiode abgebildet. In diesem Fall liefert die Quadrantdiode 0 Volt für beide Differenzsignale, was der Führungsgröße genügt.

Um Regelfehler durch Bildumkehr zu vermeiden, welche entstehen würden, wenn man die Linse weiter als die Brennweite von der Quadrantdiode entfernt, ist es ratsam, die Quadrantdiode nahe dem Brennpunkt, im Zweifelsfall jedoch näher an der Linse, zu positionieren. Der Grund dafür ist, dass sich ein vor der Brennebene nach oben bewegender Strahl nach der Brennebene nach unten bewegt und die von der Quadrantdiode erzeugte Regelgröße ändert so ihr Vorzeichen (Abb. 2.3).

Da der Mittelpunkt der Quadrantdiode nie perfekt auf der optischen Achse liegt, ist der daraus resultierende Offset der Regelgröße zu beachten. Dies ist

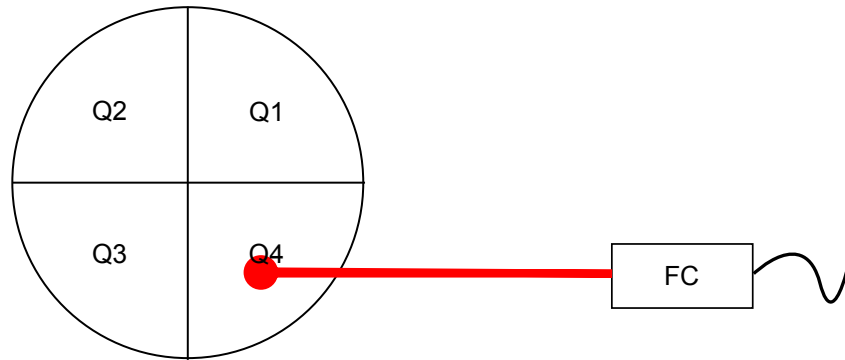


Abbildung 2.4.: Faserauskoppler FC mit Singlemode-Faser und rotem Laserstrahl (650 nm), nur Q4 wird angeleuchtet

jedoch unproblematisch, da der Offset mit einer Korrektur der Führungsgröße am Regler korrigiert werden kann.

Weitere technische Details zur Spannungsversorgung der Quadrantendiode findet sich im Anhang A.

Um die Leistung zu ermitteln, welche der Beacon haben sollte, ist es wichtig, zu wissen, welche Signalstärken der Quadrantendiode bei welchen Lichtleistungen zu erwarten sind.

Dazu wurde die Quadrantendiode ausschließlich auf einem Quadranten (Q4) beleuchtet (vgl. Abb. 2.4) und anschließend die Lichtleistung variiert. Das Ergebnis für die Spannung V_{B-T} bei verschiedenen Lichtleistungen ist in Abb. 2.5a aufgetragen, für die Spannung V_{L-R} in Abb. 2.5b.

Gemäß dem Datenblatt [6] erwartet man einen Wert von:

$$V_{B-T} = (I_{3,4} - I_{1,2}) \cdot 10^4 \frac{V}{A}, \quad (2.1)$$

$$V_{L-R} = (I_{2,3} - I_{1,4}) \cdot 10^4 \frac{V}{A}. \quad (2.2)$$

Wobei $I_{x,y}$ für die Summe der Ströme steht, welche die Quadranten Qx und Qy liefern. Laut Abb. 2.6 ergibt sich für 1 W Leistung auf den Photodioden, 0,42 A Strom.

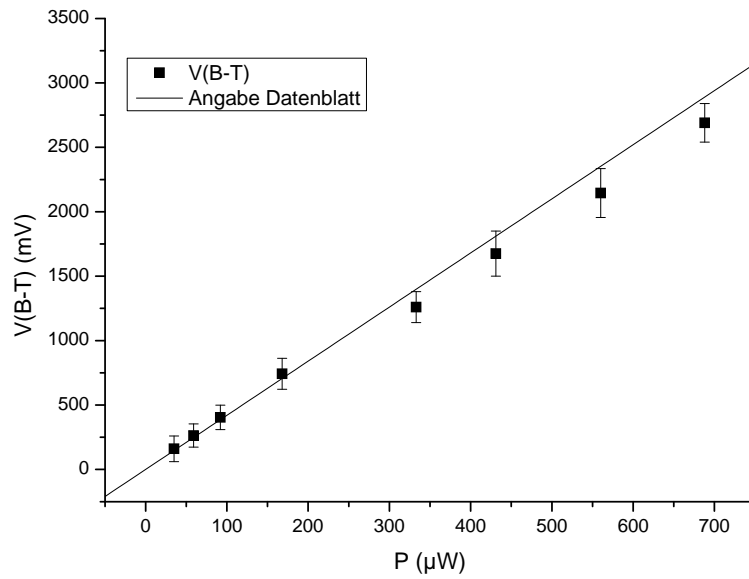
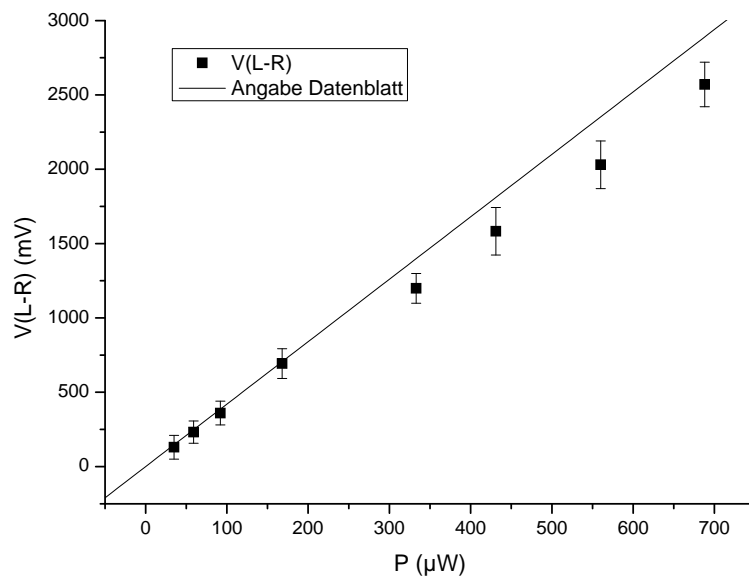
(a) V_{B-T} (b) V_{L-R}

Abbildung 2.5.: Leistungs-Spannungs Diagramm. Q4 wurde beleuchtet. Mit Messpunkten und Angabe des Datenblattes nach Formeln (2.1) und (2.2). Als Fehlerbalken ist das Rauschen der Signale aufgetragen, welches sich bei der Messung am Oszilloskop erkennen lässt.

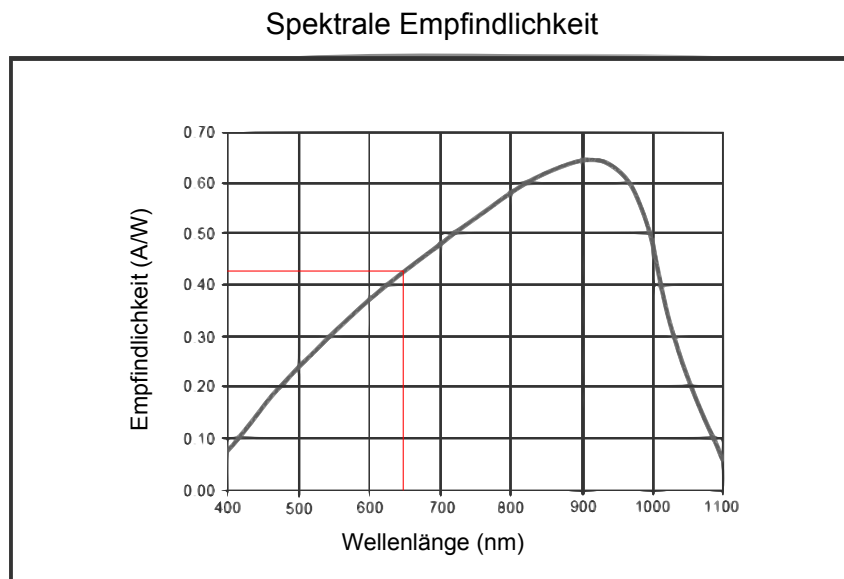


Abbildung 2.6.: Wellenlängenabhängige Empfindlichkeit der Photodioden, Rot: Antwort bei 650 nm ca. 0,42 A/W [6]

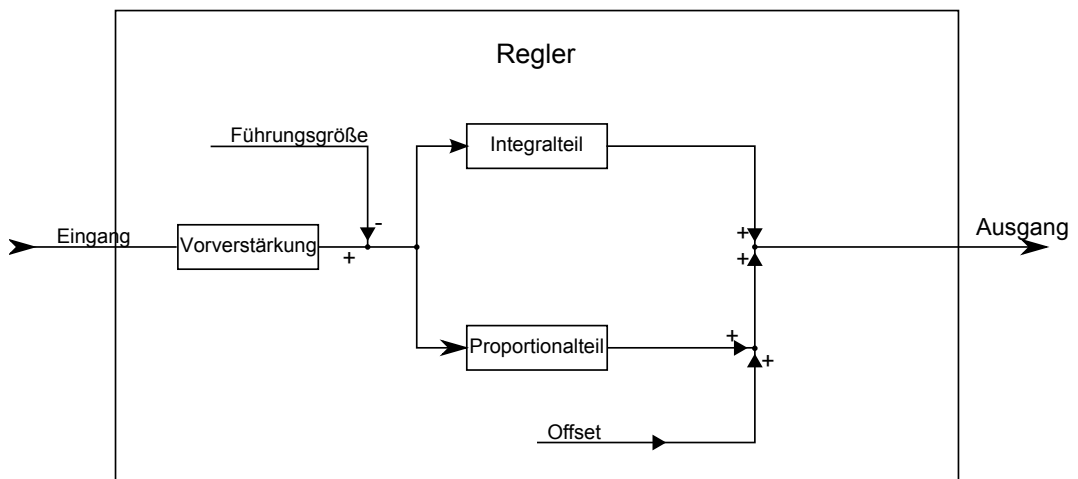


Abbildung 2.7.: Schematische Darstellung der Regelschaltung

2.3. Regler

Für die Regelung der horizontalen und der vertikalen Richtung wurden je ein Regler nach [7] verwendet. Das Design bietet eine PID-Regler mit verschiedenen Anpassungsmöglichkeiten. Ein solcher besteht im Allgemeinen aus einem Proportional-, Integral- und Differenzialteil, die das Eingangssignal entweder proportional verstärken, zeitlich integrieren oder differenzieren. Die Summe aller drei Kanäle, liefert dann am Ausgang des Reglers die Stellgröße.

Auf den Differentialteil wurde verzichtet, um die Regelung möglichst einfach und stabil zu halten. Es wurde darauf geachtet den elektrischen Aufbau der Regler gleichzugestalten.

Der Proportionalteil sowie die Vorverstärkung bestehen je aus einer invertierenden Verstärkerschaltung. Diese besteht aus einem Operationsverstärker (OP), dessen invertierender Eingang mit dem Ausgang über einen Widerstand R_2 gegengekoppelt wird, während der nicht invertierende Eingang auf Masse geschaltet ist (Abb. 2.8a). Die Gegenkopplung bewirkt, dass der Ausgang des Operationsverstärkers den invertierenden Eingang immer so aussteuert, dass sich am Eingang auch Massenspotential ergibt. Am Ausgang des Operationsverstärkers ergibt sich also ein Signal

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e. \quad (2.3)$$

Wobei U_e dem Eingangssignal und R_1 dem Widerstand, über welchen das Eingangssignal läuft, entspricht.

Der Integrator des Reglers besteht im Wesentlichen aus einem Operationsverstärker und einem gegengekoppelten Kondensator, was dazu führt, dass die Spannung am Ausgang des Operationsverstärkers mit der Ladung auf dem Kondensator ansteigt (Abb. 2.8b). Das heißt, fließt Ladung auf den Kondensator, erhöht sich die Ausgangsspannung des Integralteils. Ist die Eingangsspannung null, so fließt keine weitere Ladung auf den Kondensator und die Ausgangsspannung bleibt gleich. Der Integralteil kann sich also „merken“, bei welcher Spannung die Mitte der Quadrantendiode getroffen wird, da diese dort die Spannung Null liefert.

Zudem wurden Schalter eingebaut um die Vorverstärkung bzw. die Verstärkung des Proportionalteils bei Bedarf verdoppeln zu können. Zusätzlich kann der Proportionalteil mit Hilfe eines Potentiometers auf 0 bis 20 fache Verstärkung eingestellt werden, bzw. auf 0 bis 40 fache Verstärkung bei verdoppelnder Stellung des Schalters.

Der genaue Schaltplan der Regler finden sich im Anhang B.

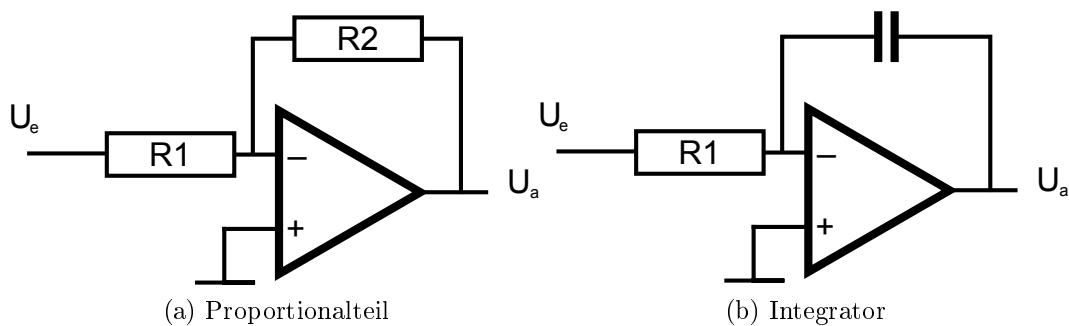


Abbildung 2.8.: Die in den Reglern verwendeten Grundschaltungen eines Proportionalteils und eines Integrators.

2.4. Piezospiegel

Der verwendete Piezospiegel ist ein Eigenbau. Es wurde ein Halbzollspiegel auf einen monolithischen Piezokristall geklebt und dieser in einen passenden Halter. Die genaue Zeichnung findet sich im Anhang C.

Der Piezokristall selbst ist als Röhrchen geformt, auf welchem insgesamt fünf Leiterflächen aufgebracht sind. Die Innenseite ist komplett leitend und wird mit Masse belegt. Auf der Außenseite des Röhrchens sind vier Leiterflächen vorhanden. Je zwei davon liegen sich, wie in Abb. 2.9 dargestellt, gegenüber. Jede der äußeren Leiterflächen darf mit einer Spannung von 0 bis 200 V angesteuert werden. Es werden also vier HV-Verstärker benutzt, einer für jede Leiterfläche.

Wird nun zum Beispiel die grüne Fläche mit 200 Volt angesteuert, neigt sich der Kristall nach vorne, wird die Blaue angesteuert, nach hinten. Das heißt, den maximalen Ausschlag erhält man für eine Spannungsdifferenz von 200 V an gegenüberliegenden Flächen. Bei gleicher Spannung an beiden Flächen ist kein Ausschlag vorhanden. Daher müssen gegenüberliegende Flächen immer das jeweils an 100 V gespiegelte Signal der anderen erhalten.(vgl. Abb. 2.11). Dies wird noch vor den Verstärkern bewerkstelligt, indem man das Ausgangssignal der Regler (0...14 V) an beide Verstärker liefert und vor dem Eingang des „grünen“ Verstärkers an 7 V spiegelt. Technisch wird dies durch eine invertierende OP-Schaltung umgesetzt (siehe Anhang D).

2.4.1. Bandbreite

Die Frage nach der Bandbreite des Piezokristalls ist nicht eindeutig zu beantworten. Da der Piezo nur mit den Verstärkern angesteuert werden kann, ist die Bandbreite des Piezokristalls auch immer an die Bandbreite der Verstärker

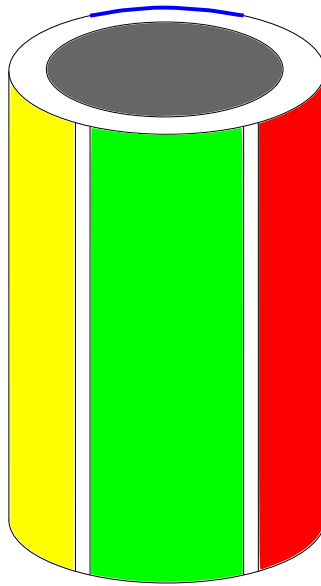


Abbildung 2.9.: Schematische Darstellung des im Piezospiegel verbauten Kristalls

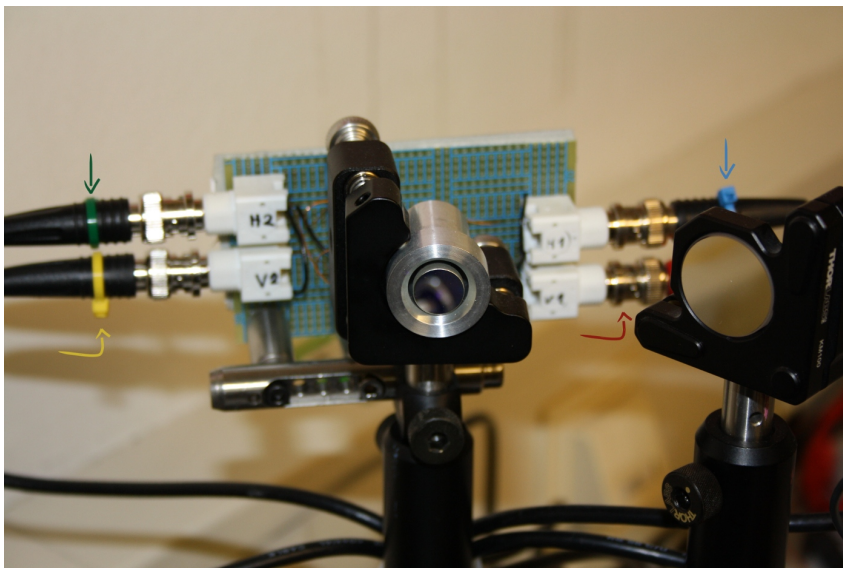


Abbildung 2.10.: Foto des Piezospiegels. Die Farben der BNC-Kabel entsprechen den Farben in Abb. 2.9.

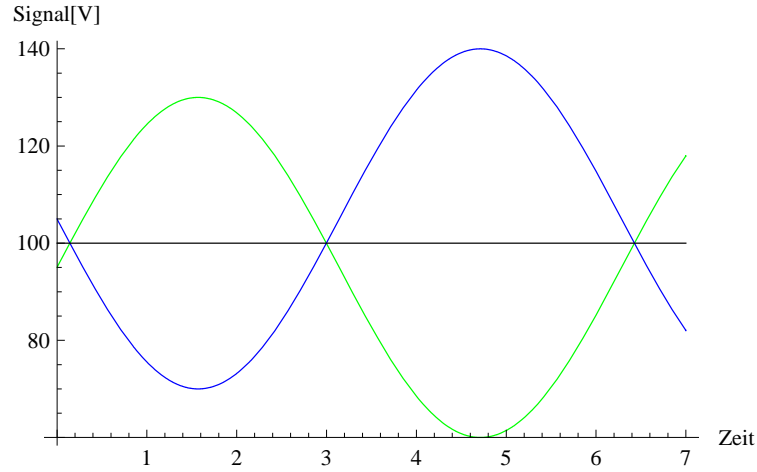


Abbildung 2.11.: Beispielsignal der blauen und grünen Leiterfläche; gespiegelt an 100 V.

gekoppelt.

Denoch wurde die mittlere Auslenkung des Piezokristalls bei verschiedenen Frequenzen bestimmt. Dazu wurde ein kollimierter Laserstrahl über den Piezospiegel umgelenkt und anschließend die Auslenkung des Strahls auf einer CCD-Kamera bestimmt (vgl. Abb. 2.12). An die Eingänge der Verstärker lieferte ein Funktionengenerator Sinusspannungen zwischen 0 und 10V bei verschiedenen Frequenzen.

Die mittlere Auslenkung A wurde nach folgender Formel berechnet, wobei N zufällig gewählte Messwerte für die Positionen (x_k, y_k) des Laserstrahls auf der CCD-Kamera aufgenommen wurden:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.4)$$

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.5)$$

$$x_{Nk} = x_k - X \quad k \in \{0, 1, \dots, N\} \quad (2.6)$$

$$y_{Nk} = y_k - Y \quad k \in \{0, 1, \dots, N\} \quad (2.7)$$

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{x_{Ni}^2 + y_{Ni}^2} \quad (2.8)$$

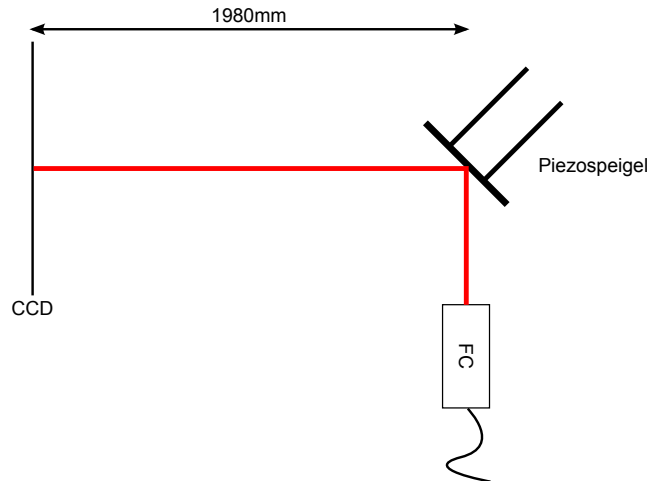


Abbildung 2.12.: Aufbau zur Bestimmung der Auslenkung der Piezospiegels. Mit Faserkoppler (FC) und CCD-Kamera (CCD). Der optische Weg zwischen CCD Kamera und Faserkoppler betrug 1980 mm.

Das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 2.13 aufgetragen. Es fällt auf, dass die Auslenkung kontinuierlich abfällt.

2.4.2. Ablenkwinkel

Eine weitere wichtige Kenngröße des Piezospiegels ist der Ablenkwinkel. Der Ablenkwinkel ist der Winkel, um welchen ein Lichtstrahl vom Spiegel abgelenkt wird. Es ist darauf zu achten, dass dieser Winkel doppelt so groß wie der eigentliche Neigungswinkel des Spiegels ist (Abb. 2.14).

Um den Ablenkwinkel zu bestimmen, wurde wieder der in Abb. 2.12 beschriebene Aufbau verwendet. Nur wurden dieses Mal die Eingänge der Verstärker für eine Richtung (horizontal oder vertikal) an das Labornetzteil angeschlossen, und damit die Spannung zwischen 0 und 14 V variiert. Gleichzeitig wurden zu 500 zufällig gewählten Zeitpunkten die Position des Laserstrahls auf der CCD-Kamera gemessen. Die Punkte wurden anschließend nach Gleichungen (2.4) bis (2.7) um ihren Schwerpunkt angeordnet und die maximale Auslenkung in x- und y-Richtung bestimmt. Da die Software der CCD-Kamera die Auslenkung a angibt gilt für den Ablenkwinkel Φ in horizontaler und vertikaler Richtung in Kleinwinkelnäherung:

$$\Phi_{H,V} = 2\alpha_{H,V} = \frac{a_{H,V}}{1980mm}. \quad (2.9)$$

Da die Strecke von 1980 mm im Aufbau nicht als eine Strecke realisiert

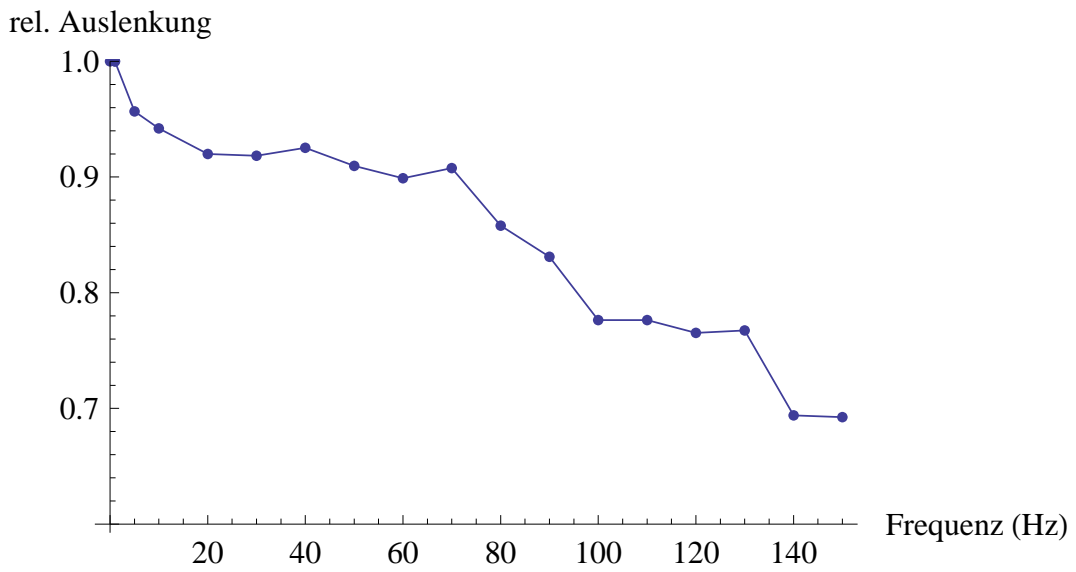


Abbildung 2.13.: Auslenkung des Piezos bei verschiedenen Frequenzen, im Verhältnis zur Auslenkung bei 1 Hz.

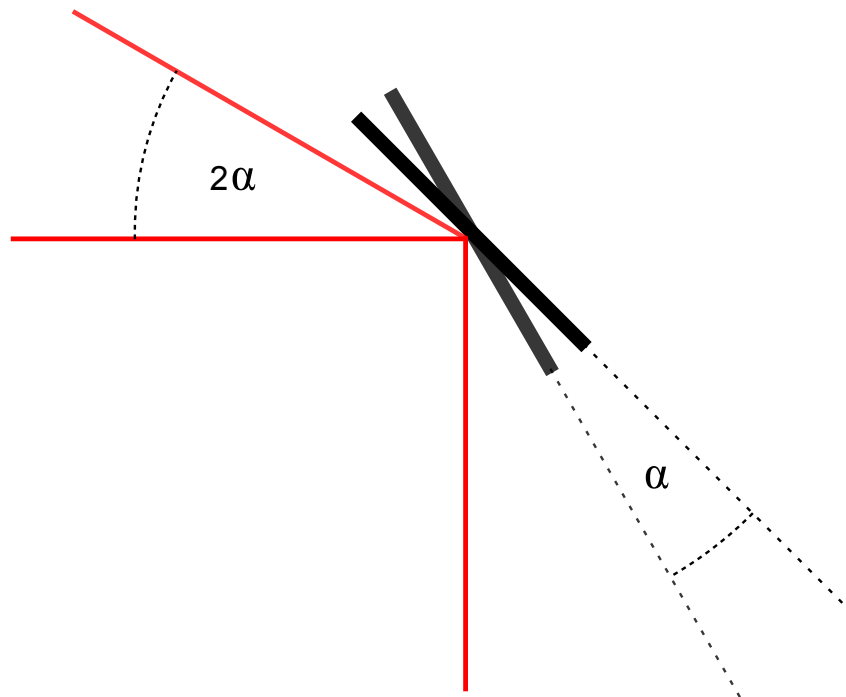


Abbildung 2.14.: Zusammenhang zwischen Neigungswinkel des Spiegels α und Ablenkwinkel 2α

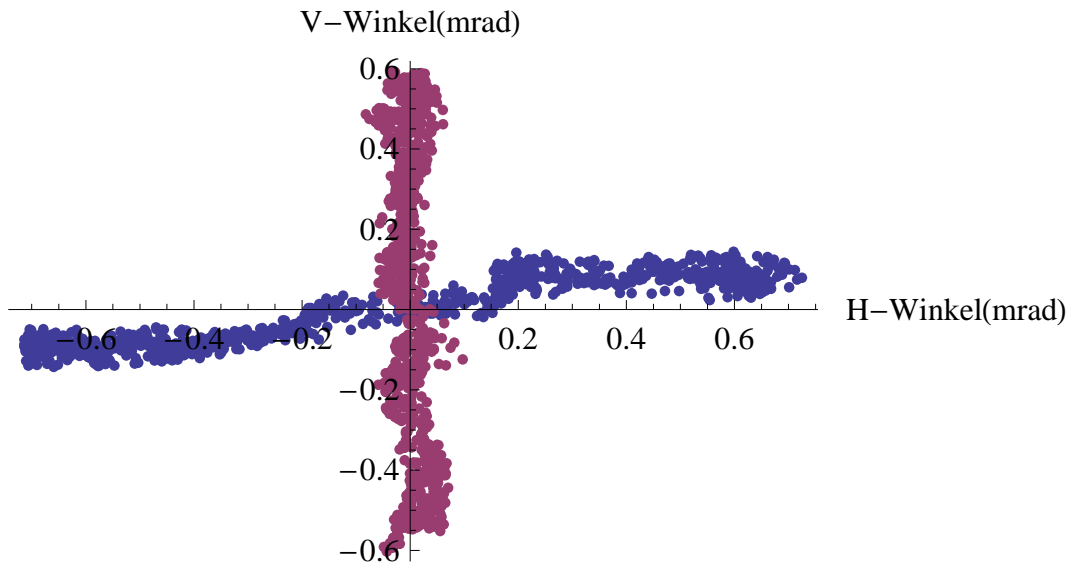


Abbildung 2.15.: Erreichbare Winkel in horizontaler und vertikaler Richtung. Die aufgetragenen Winkel wurden nach Formel (2.9) berechnet. Auffällig ist, dass die Linien, die die Messpunkte bilden, sich nicht in einem Winkel von 90° schneiden. Die beiden Richtungen sind also nicht vollständig entkoppelt, was zu einer schlechteren Regelung führen kann.

werden konnte, sondern über insgesamt 4 Spiegel läuft, muss der Messfehler für diese Strecke wie folgt angenommen werden. Wird für jede Teilstrecke ein Messfehler von ± 1 cm angenommen, so ergibt sich ein relativer Fehler von 2,5 %. Für die nach Gleichung (2.9) berechneten maximal erreichbaren Winkel folgt dann

$$\Phi_{H,max} = \frac{a_{H,max}}{1980mm} = (1,43 \pm 0,04) mrad \quad (2.10)$$

und

$$\Phi_{V,max} = \frac{a_{V,max}}{1980mm} = (1,19 \pm 0,03) mrad. \quad (2.11)$$

Das Ergebnis wird nochmals in Abb. 2.15 dargestellt, wo zu erkennen ist, dass der Winkel in vertikaler Richtung kleiner ist. Dreht man jedoch den ganzen Piezospiegel in der Halterung um 90° , so erhält man trotzdem für die jetzt vertikale Richtung den kleineren Winkel. Die Ursache für diesen Effekt ließ sich nicht mit Sicherheit bestimmen.

2.5. HV-Verstärker

Um das vom Regler gelieferte Signal für den Piezospiegel nutzbar zu machen, muss es noch verstärkt werden. Als HV-Verstärker wurden die schon vorhandenen Verstärker nach [8] benutzt. Der im Spiegel verwendete Piezo arbeitet zwischen 0 und 200 V. Da die Regler eine Ausgangsspannung von 0 bis 14 V liefern, wird das Signal 15 fach verstärkt, sodass sich maximal 210 V ergeben.

Um die Bandbreite der Verstärker zu bestimmen, wurden Sinusspannungen (0...10 V) mit unterschiedlichen Frequenzen an die Eingänge der Verstärker gelegt¹. Der Piezospiegel war währenddessen an die Ausgänge der Verstärker angeschlossen, wo auch das Ausgangssignal gemessen wurde. Das Ergebnis der Messung bei den verschiedenen Frequenzen findet sich in Abb. 2.16. Es fällt auf, dass ab ca. 70 Hz (Abb. 2.16f) Störungen an der Stelle der höchsten Spannungen auftreten. Leider ließ sich dafür keine eindeutige Erklärung finden, jedoch tritt diese Störung nicht auf, wenn der Piezospiegel nicht angeschlossen ist. Es wäre möglich, dass der Piezo selbst zu schwingen beginnt, und damit Spannungen erzeugt.

Eine saubere Steuerung des Piezospiegels mithilfe der Verstärker ist also nur bis zu einer Frequenz von ca. 70 Hz garantiert.

¹Da der Funktionengenerator maximal 10 V liefern kann und nicht 14 V wie die Regler, kommt es durch die Spiegelung an 7 V zu den in Abb. 2.16 erkennbaren unsymmetrischen Ausgangsspannungen zwischen dem rechten und linken (gelben und roten) Kanal. Analog für die vertikale Richtung.

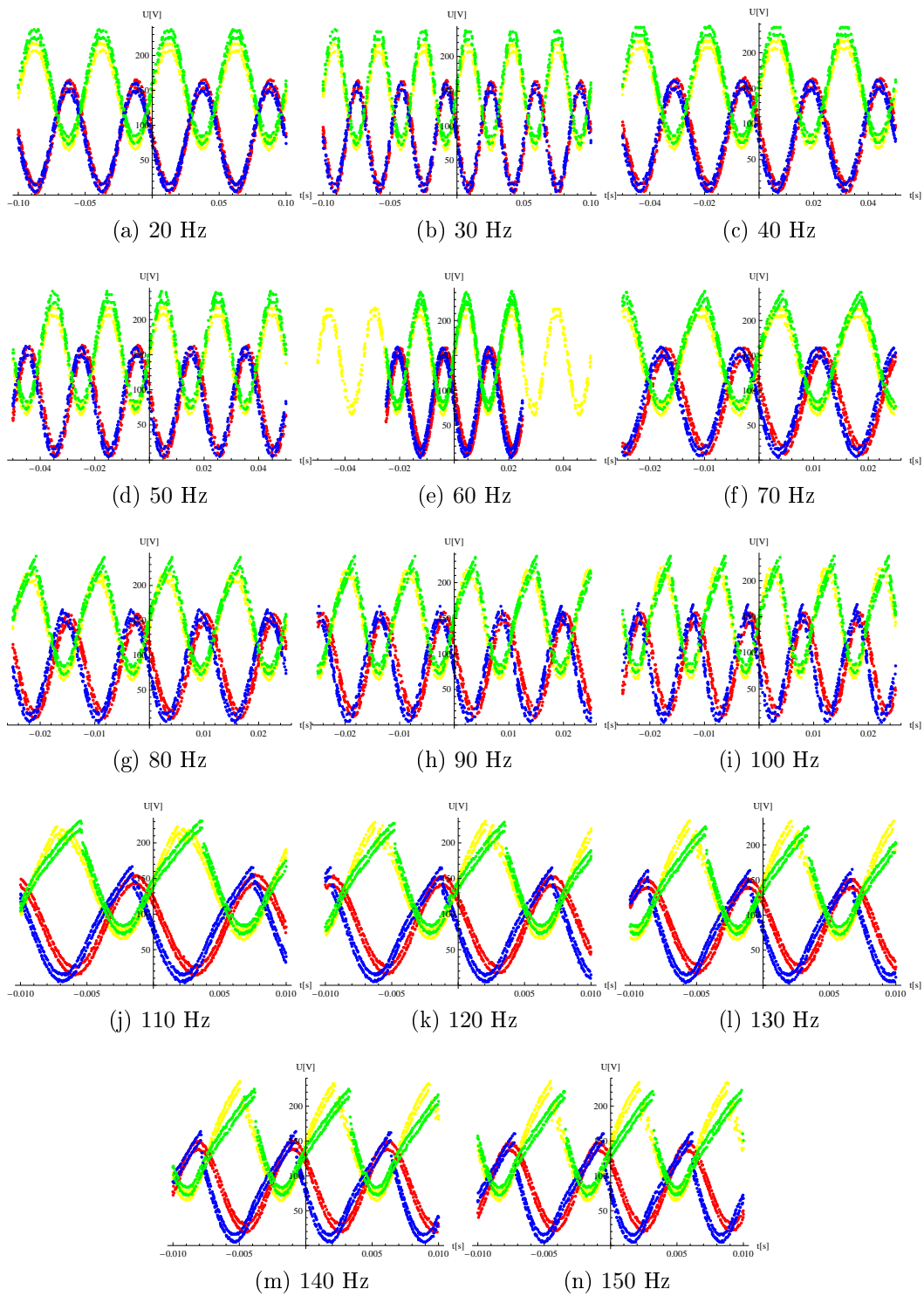


Abbildung 2.16.: Spannungen am Ausgang der Verstärker. Grün: Verstärker I, Rot Verstärker II, Blau: Verstärker III, Gelb: Verstärker IV. Der Farbcode entspricht dem in Abb. 2.9

3. Gesamtsystem

Im Weiteren soll nun das Gesamtsystem (siehe Abb. 3.1) beschrieben und als Ganzes charakterisiert werden. Dazu bietet der Aufbau im Labor einige Möglichkeiten:

Es wurden zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge überlagert, um den Beacon und das später zu übertragende Signal simulieren zu können. Ein auf einen Lautsprecher geklebter Spiegel (Abb. 3.2) dient zur Erzeugung von Störungen bei verschiedenen Frequenzen, die Turbulenzen der Atmosphäre simulieren. Der Piezospiegel soll diese Störungen wieder herausregeln. Anschließend kann die Pointingstabilität des Signallasers mit einer CCD Kamera mit und ohne Regelung vermessen werden.

Ein langer Weg zur Kamera ist wichtig, damit Winkeländerungen auf der Kamera gut beobachtet werden können, denn Auslenkungsänderungen auf der CCD Kamera, die durch Winkeländerungen verursacht werden, werden proportional zur Entfernung zwischen Piezospiegel und Kamera größer. Im Gegensatz dazu bleiben eventuelle Versatzänderungen der Strahlen entlang der Strecke konstant (Abb. 3.3).

Der Aufbau mit dem Lautsprecher hat den Vorteil, dass dieser mit Hilfe eines Funktionengenerators auf einer großen Bandbreite in Schwingungen versetzt werden kann und sich damit verschieden schnelle Störungen simulieren lassen. Für alle folgenden Messungen wurde die Regelung für eine Störung bei mittlerer Frequenz optimiert und dann nicht weiter verändert, um eine realistische Regelsituation simulieren zu können, in der Störungen mehrerer Frequenzen gleichzeitig auftreten und somit keine Anpassung der Regler vorgenommen werden kann.

3.1. Frequenzabhängigkeit der Regelung im Gesamtsystem

Als erstes sollen Störungen bei verschiedenen Frequenzen simuliert werden. Dazu werden verschieden frequente Sinusspannungen an den Lautsprecher gelegt. Da der Lautsprecherspiegel bei unterschiedlichen Frequenzen Störungen unterschiedlicher Amplituden verursacht, muss darauf geachtet werden, die

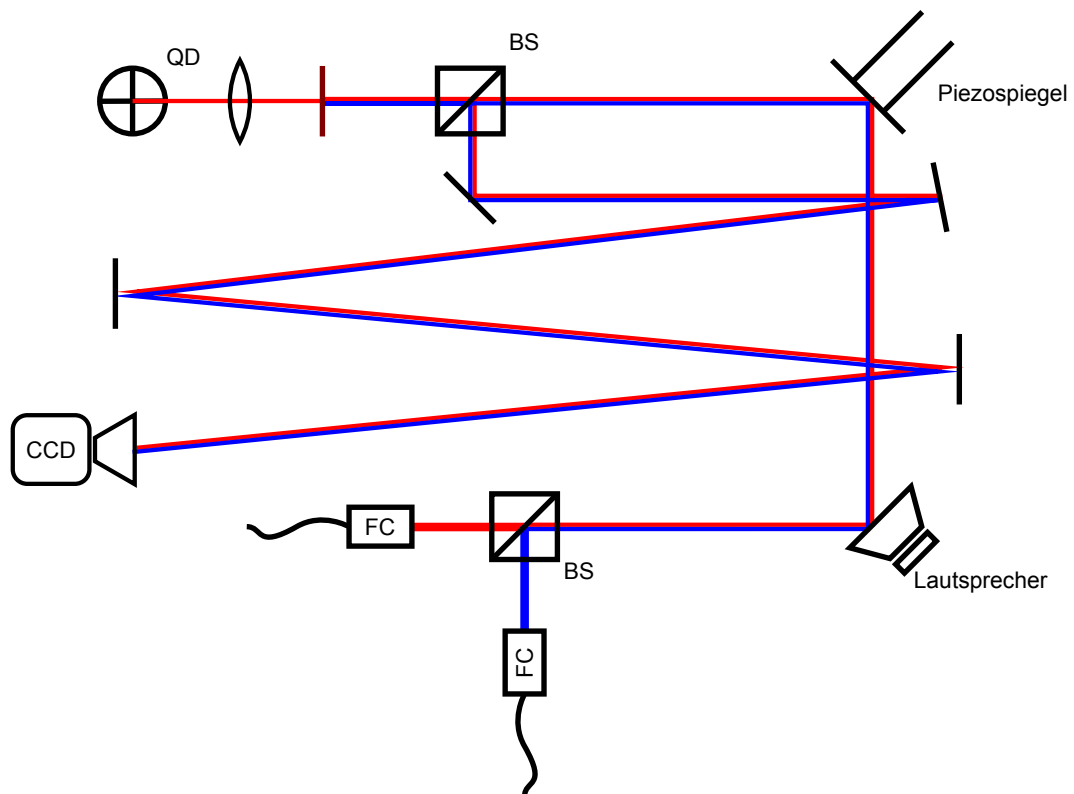


Abbildung 3.1.: Aufbau des gesamten Systems im Labor. Mit Beamsplittern (BS), Auskopplern der Laser (FC), Lautsprecherspiegel, Piezospiegel, CCD Kamera (CCD) und Quadrantendiode (QD) mit davor liegendem Blaufilter und Linse. Ein Strahl (blau) ist kollimiert und dient zur Simulation des Signals, welches später übertragen werden soll. Ein Strahl (rot) ist leicht divergent und übernimmt die Funktion des Beacon, welcher später zur Ausrichtung benutzt wird. Beide Laserstrahlen laufen über einen, an einem Lautsprecher festgeklebten Spiegel (Abb. 3.2), auf den Piezospiegel und anschließend auf einen zweiten Beamsplitter. Nach dem zweiten Beamsplitter läuft der erste Teil der beiden Strahlen auf einen Blaufilter, sodass nur der rote, als Beacon benutzte, Teil auf die Quadrantendiode trifft. Der zweite Teil läuft über insgesamt vier Spiegel auf die CCD Kamera. Von der CCD Kamera wird nur der Signalstrahl (blau) beobachtet. Eine Filterung ist an dieser Stelle nicht nötig, da der divergente rote Strahl an dieser Stelle viel schwächer ist.

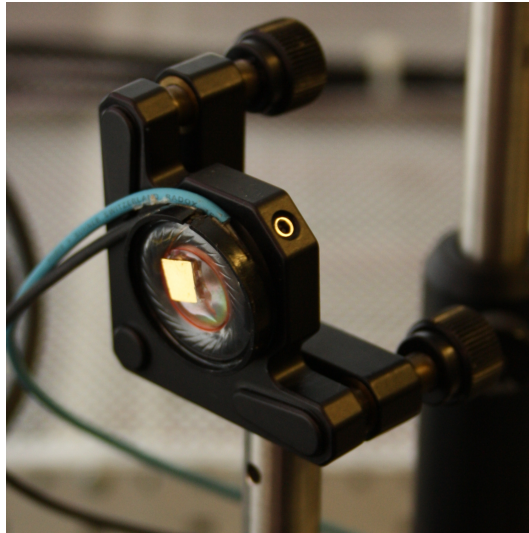


Abbildung 3.2.: Auf Lautsprecher geklebter Spiegel. Zur Simulation von Störungen.

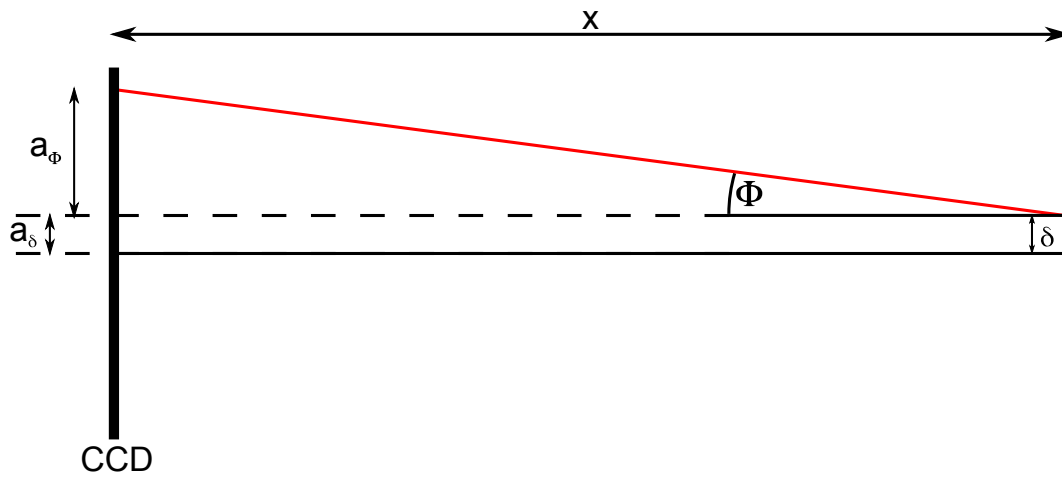


Abbildung 3.3.: Ein Lichtstrahl mit Versatz δ und Winkel Φ trifft auf die CCD Kamera. Es ist zu sehen, dass die durch den Winkel verursachte Ablenkung a_Φ proportional zur Strecke x ansteigt, während die durch den Versatz verursachte Ablenkung a_δ konstant bleibt.

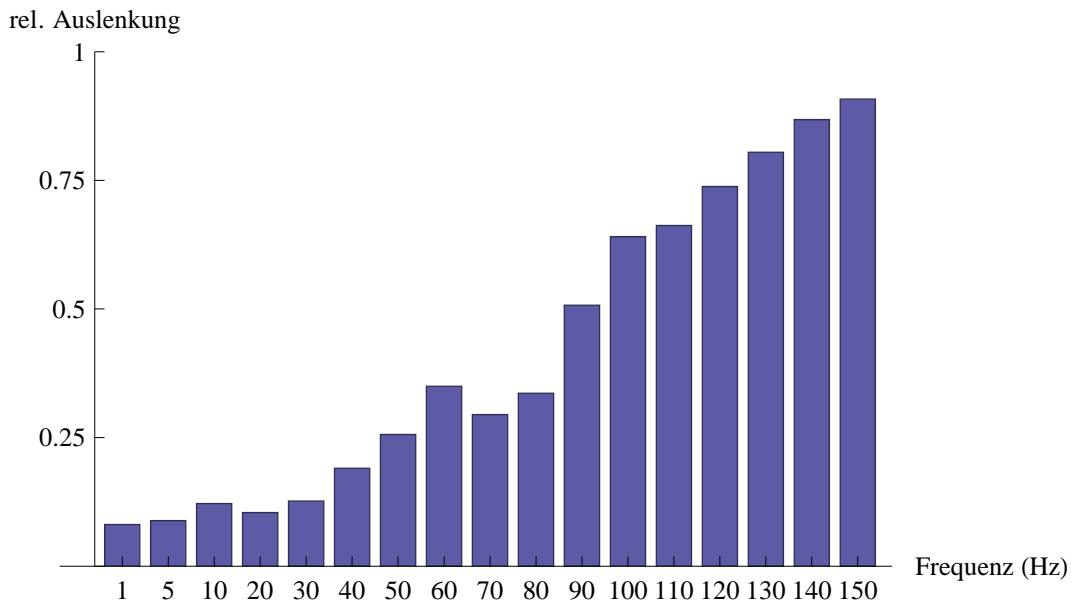


Abbildung 3.4.: Mittlere Abweichung des Signallasers auf dem CCD-Chip bei verschiedenen Frequenzen. Die blauen Balken zeigen den Anteil der trotz Regelung verbliebenen Störung. Die Beacon-Leistung auf der Photodiode betrug hier $80 \mu\text{W}$. Die mittlere Abweichung ohne Regelung wurde auf 1 normiert.

Spannung am Lautsprecher so zu wählen, dass die Störungen ähnliche Amplituden haben. Die Spannung am Lautsprecher wurde so eingestellt, dass die resultierenden Störungen immer im Bereich zwischen 50 und 70 % von $\Phi_{V,max}$ (vgl. Gl. (2.11)) lag.

Anschließend wurden die Abweichungen des Signalstrahls auf der CCD Kamera mit und ohne Regelung vermessen. Dazu wurden ähnlich wie in Kapitel 2.4.1 zu 1000 zufälligen Zeitpunkten die Positionen des Signallasers auf dem CCD-Chip aufgenommen. Anschließend wurden die mittlere Abweichungen A für den Fall mit und ohne Regelung nach Gleichungen (2.4) bis (2.8) bestimmt. Das Ergebnis ist in Abb. 3.4 dargestellt. Die Balken zeigen den trotz Regelung verblieben Anteil der mittleren Abweichung. Es fällt auf, dass die Regelung ab ca. 30 Hz schlechter wird.

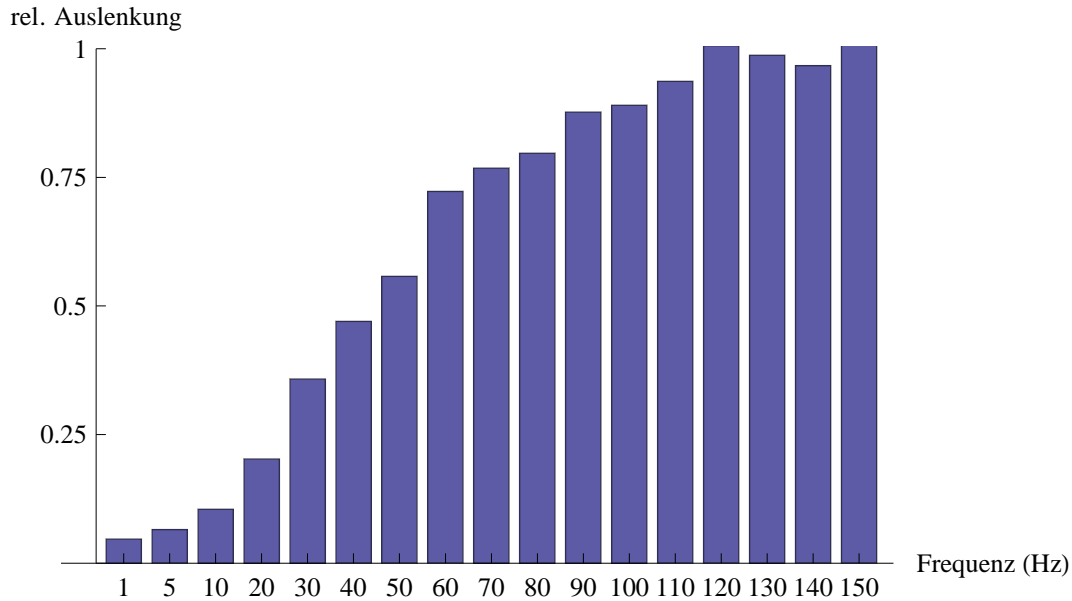


Abbildung 3.5.: Mittlere Abweichung des Signallasers auf dem CCD-Chip bei verschiedenen Frequenzen. Die blauen Balken zeigen den Anteil der trotz Regelung verbliebenen Störung. Die Beacon-Leistung auf der Photodiode betrug hier $40 \mu\text{W}$. Die mittlere Abweichung ohne Regelung wurde auf 1 normiert.

3.2. Beacon-Leistungsabhängigkeit der Regelung im Gesamtsystem

In einer weiteren Messreihe wurde die Leistung des Beacons verringert und ebenfalls die Regelung bei verschiedenen Frequenzen vermessen. Es fällt auf, dass im Vergleich zu Abbildung 3.4 die Regelung in Abbildung 3.5 bei deutlich niedrigeren Frequenzen schlechter wird. Eine weitere Messung wurde bei $20 \mu\text{W}$ durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Auch hier fällt auf, dass die Regelung im Vergleich zur Regelung bei einer Beaconleistung von $40 \mu\text{W}$ noch einmal schlechter wurde.

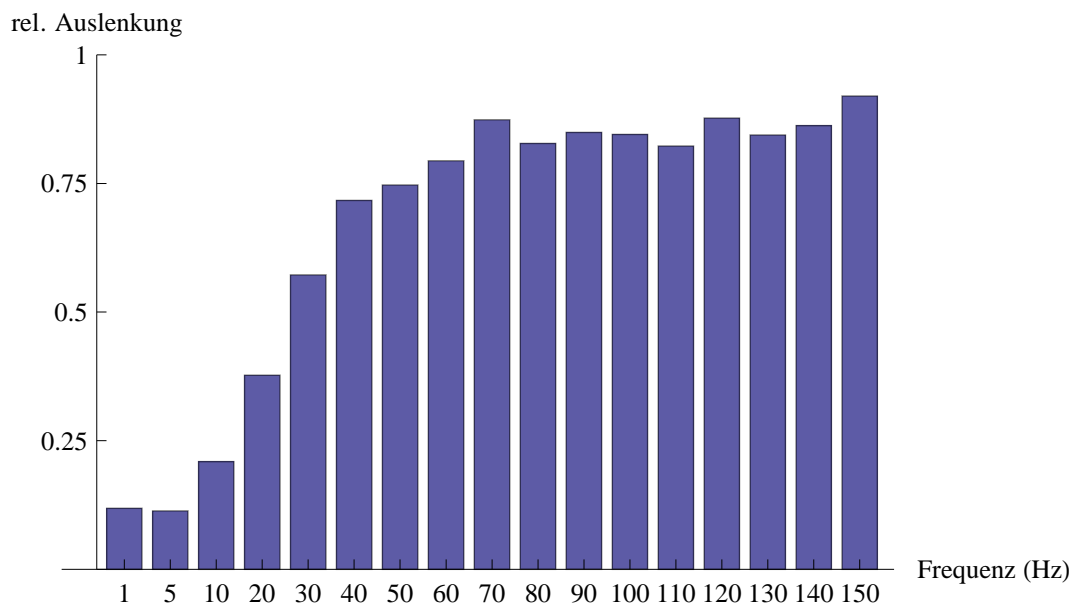


Abbildung 3.6.: Mittlere Abweichung des Signallasers auf dem CCD-Chip bei verschiedenen Frequenzen. Die blauen Balken zeigen den Anteil der trotz Regelung verbliebenen Störung. Die Beacon-Leistung auf der Photodiode betrug hier $20 \mu\text{W}$. Die mittlere Abweichung ohne Regelung wurde auf 1 normiert.

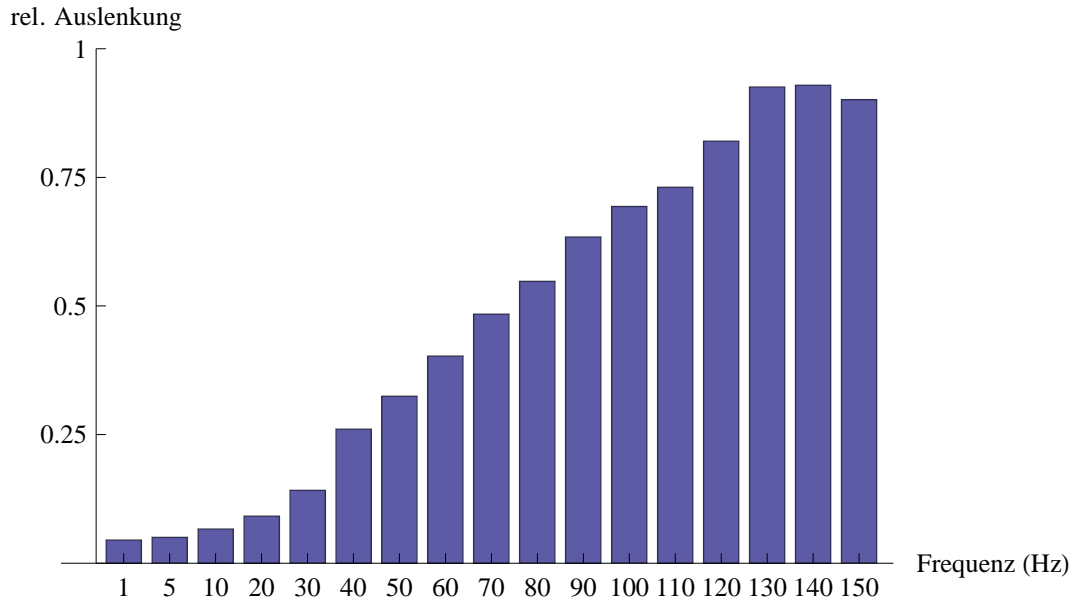


Abbildung 3.7.: Mittlere Abweichung des Signallasers auf dem CCD-Chip bei verschiedenen Frequenzen mit doppelter Vorverstärkung. Die blauen Balken zeigen den Anteil der trotz Regelung verbliebenen Störung. Die Beacon-Leistung auf der Photodiode betrug hier $40 \mu\text{W}$. Die mittlere Abweichung ohne Regelung wurde auf 1 normiert.

Es ist jedoch interessant, zu wissen, dass eine schlechtere Regelung aufgrund von weniger Beaconleistung teilweise über eine stärkere Vorverstärkung kompensiert werden kann. So wurden die Messungen bei $20 \mu\text{W}$ und $40 \mu\text{W}$ mit doppelter Vorverstärkung im Regler wiederholt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.7 und 3.8 dargestellt.

Im direkten Vergleich (Abb. 3.9) wird deutlich, dass die Regelung bei doppelter Vorverstärkung verbessert werden kann. Doch ist dieser Effekt bei mittleren Frequenzen (Abb. 3.9b) am größten. Während bei niedrigen Frequenzen (Abb. 3.9a) die Regelung auch bei niedrigen Beaconleistungen noch gut funktioniert. Bei hohen Frequenzen (Abb. 3.9c) jedoch ist die Regelung für jede Beaconleistung schlecht.

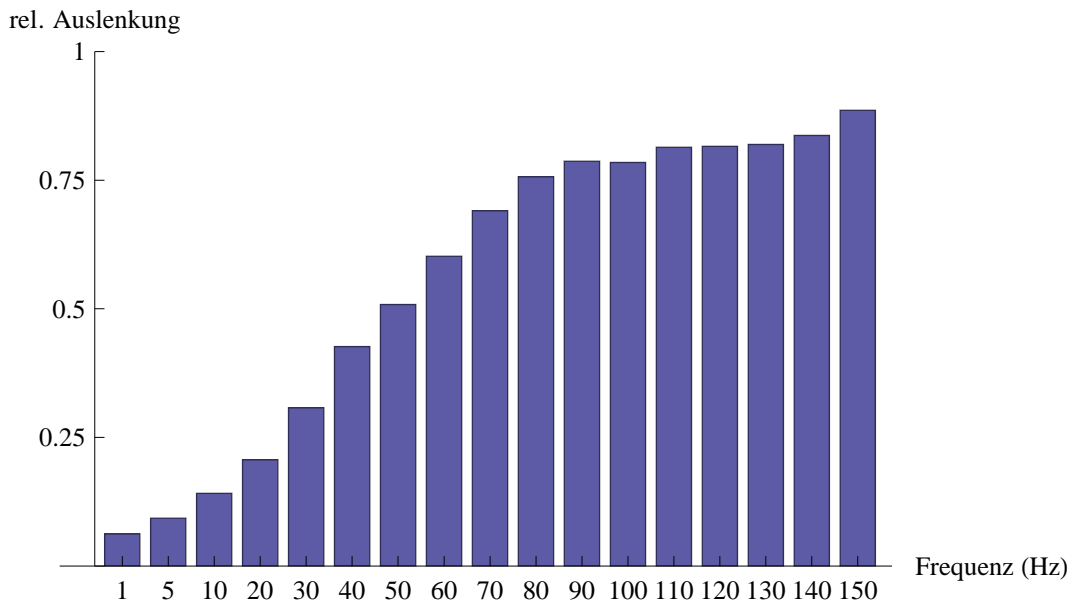
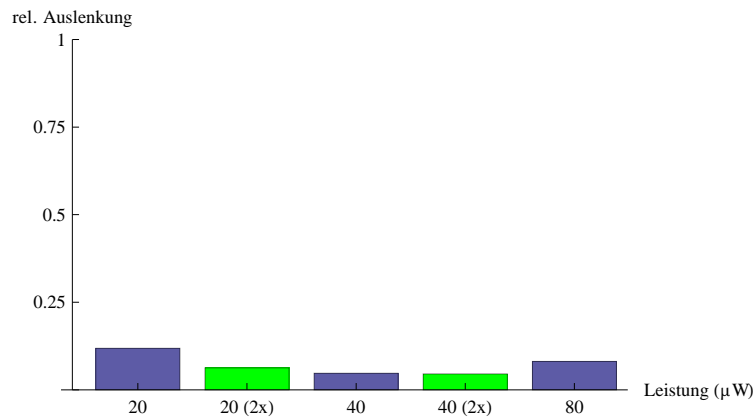
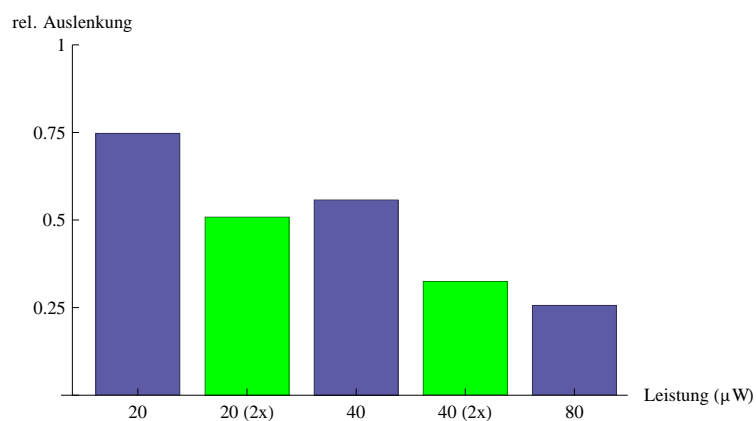


Abbildung 3.8.: Mittlere Abweichung des Signallasers auf dem CCD-Chip bei verschiedenen Frequenzen mit doppelter Vorverstärkung. Die blauen Balken zeigen den Anteil der trotz Regelung verbliebenen Störung. Die Beacon-Leistung auf der Photodiode betrug hier $20 \mu\text{W}$. Die mittlere Abweichung ohne Regelung wurde auf 1 normiert.

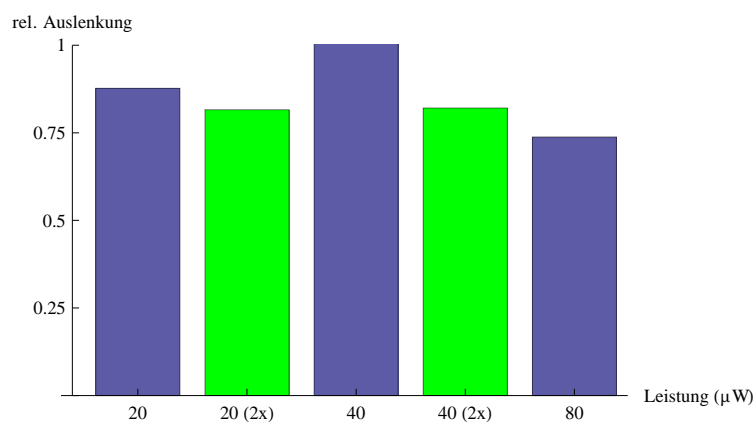
3.2. Beacon-Leistungsabhängigkeit der Regelung im Gesamtsystem



(a) 1 Hz



(b) 50 Hz



(c) 120 Hz

Abbildung 3.9.: Verbliebener Anteil der Störung bei verschiedenen Leistungen. Die grün gekennzeichneten Auslenkungen wurden bei doppelter Vorverstärkung gemessen.

3.3. Das Gesamtsystem in der Anwendung QKD

Bei der späteren Anwendung des Systems in der Freiraum-Quantenkryptografie, ist zu beachten, dass Alice und Bob mit je einem Teleskop arbeiten. Dieses Teleskop verringert den Winkel des Piezospiegels, und zwar im Maße der Vergrößerung V_T , denn die Vergrößerung eines optischen Instruments ist definiert als

$$V = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (3.1)$$

wobei ϵ_0 dem Winkel entspricht, unter welchem das menschliche Auge einen Gegenstand ohne Teleskop wahrnehmen würde. ϵ entspricht dem Winkel, unter welchem man einen Gegenstand mit Teleskop sieht. In Abbildung 3.10 erkennt man, dass weiter gilt:

$$V_T = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (3.2)$$

Hier steht f_1 für die Brennweite der konvexen Linse und f_2 für die Brennweite der konkaven Linse. Daher folgt für das in Abbildung 3.10 gezeigte Teleskop

$$\Phi_1 = \Phi_0 / V_T = \frac{2}{31} \cdot \Phi_0. \quad (3.3)$$

Nimmt man für Φ_0 den mit dem Piezospiegel maximal erreichbaren Winkel

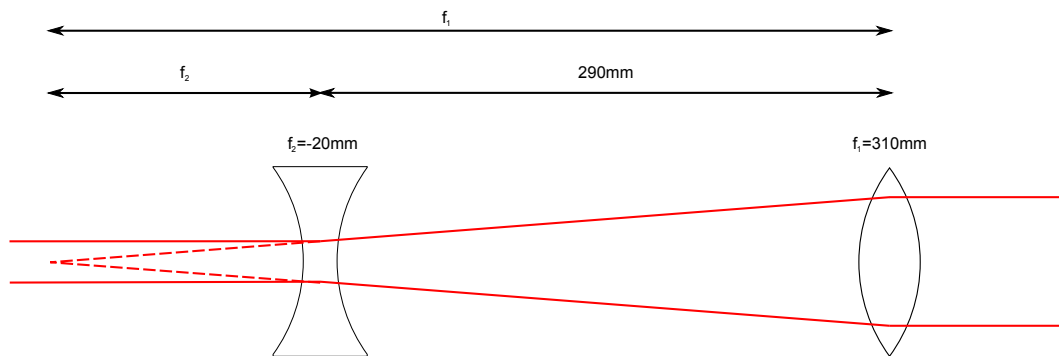


Abbildung 3.10.: Aufbau des Teleskops von Alice und Bob

Φ_{max} aus Gleichungen (2.10) und (2.11) an. So erhält man in horizontaler Richtung einen maximal erreichbaren Winkel von

$$\Phi_{H,max,T} = \frac{2}{31} \cdot (1,43 \pm 0,04)\text{mrad} = (0,092 \pm 0,003)\text{mrad} \quad (3.4)$$

und in vertikaler Richtung einen maximalen Winkel von

$$\Phi_{V,max,T} = \frac{2}{31} \cdot (1,19 \pm 0,03) mrad = (0,077 \pm 0,002) mrad \quad (3.5)$$

Diese Winkel auf 500 m gerechnet ergeben eine korregierbare Ablenkung A_{kor} von

$$A_{kor,H} = \Phi_{H,max} \cdot 500m = (46 \pm 1) mm \quad (3.6)$$

in horizontaler Richtung und von

$$A_{kor,V} = \Phi_{V,max} \cdot 500m = (38 \pm 1) mm \quad (3.7)$$

in vertikaler Richtung.

Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Ausrichtung

Will man das System bei Alice einsetzen, und damit auf 500 m in das Teleskop von Bob treffen, welches den Durchmesser D hat, so muss der Strahl innerhalb eines Sichtkegels mit Scheitelwinkel α liegen, für welchen in der Kleinwinkelnäherung gilt

$$\alpha = \frac{D}{500m}. \quad (3.8)$$

Um eine Aussage darüber treffen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Strahl innerhalb dieses Sichtkegels liegt, lässt sich aus den gemessenen Daten ein Zusammenhang ableiten.

Dazu wurden zunächst wieder alle gemessenen Positionen des Signallasers auf dem CCD Chip nach Gleichungen (2.4) bis (2.7) zu ihrem Schwerpunkt relativiert. Anschließend wurden die zu den Positionen gehörenden Winkel berechnet. Es gilt:

$$r_k = \sqrt{x_{Nk}^2 + y_{Nk}^2} \quad (3.9)$$

$$\alpha_k = \frac{r_k}{1980mm}. \quad (3.10)$$

Nun wurden die Werte α_k für den Fall mit und ohne Regelung histogrammiert (Abb. 3.11), indem die Häufigkeit N der Winkelwerte ermittelt wurden. Durch Aufsummieren der einzelnen Werte N bis zu einem bestimmten Winkel α lässt sich nun der Zusammenhang $p(\alpha)$ finden, der angibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich der Strahl innerhalb eines Kegels mit Scheitelwinkel α befindet, und damit das Teleskop von Bob trifft. Sie ist für den Fall einer Beaconleistung von $80 \mu W$ und einer Störung bei 1 Hz in Abbildung 3.12 dargestellt. Zum Vergleich sind die resultierenden Wahrscheinlichkeiten für höher frequente Störungen in Abb. 3.13 aufgetragen.

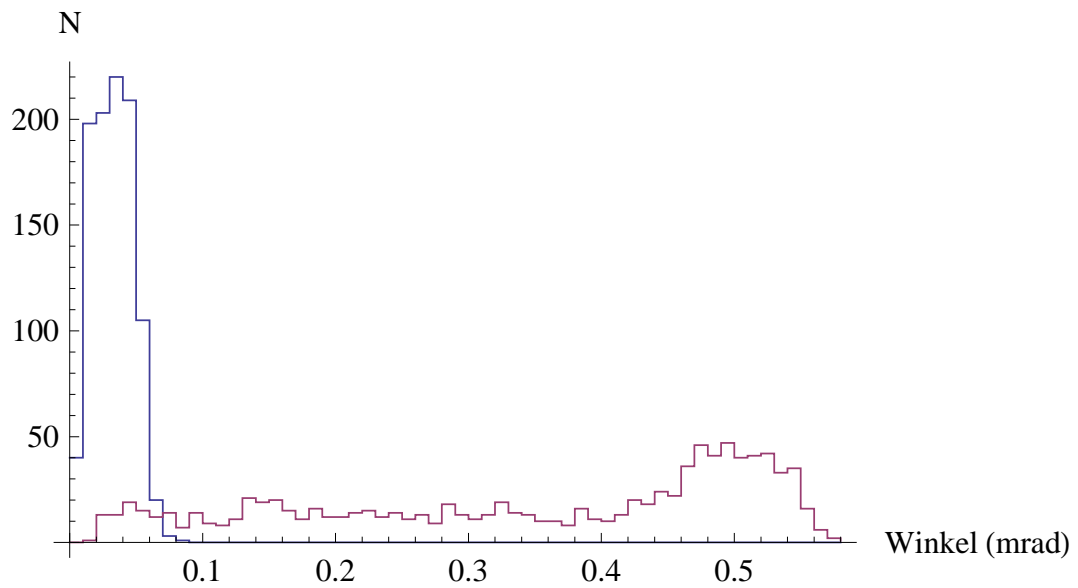


Abbildung 3.11.: Histogramm der Werte für α_k . Rot für den Fall ohne Regelung und Blau für den Fall mit Regelung. Es ist die Häufigkeit N der einzelnen Werte α_k aufgetragen. Das Histogramm wurde für die Messung mit $80 \mu\text{W}$ Beaconleistung und einer simulierten Störung bei 1 Hz aufgenommen.

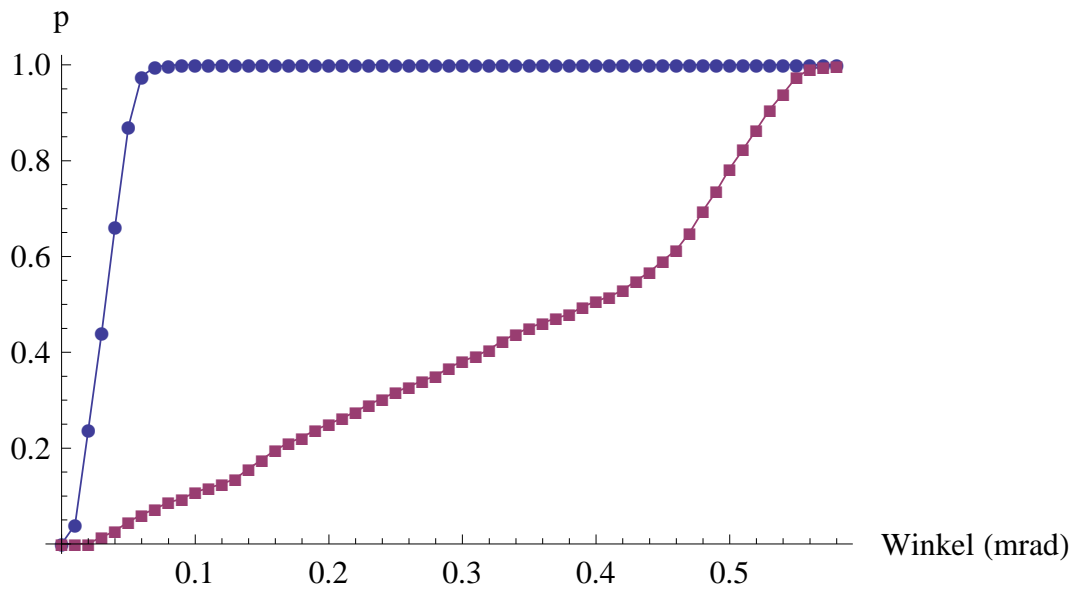
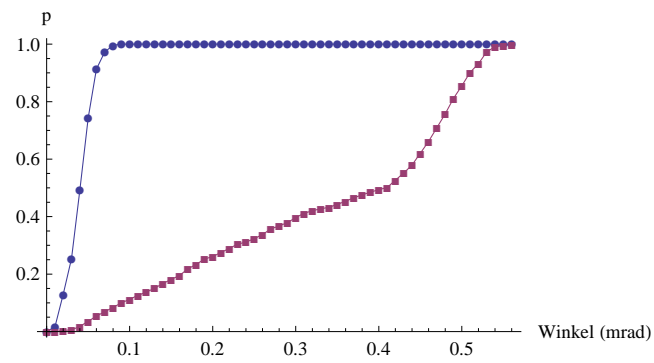
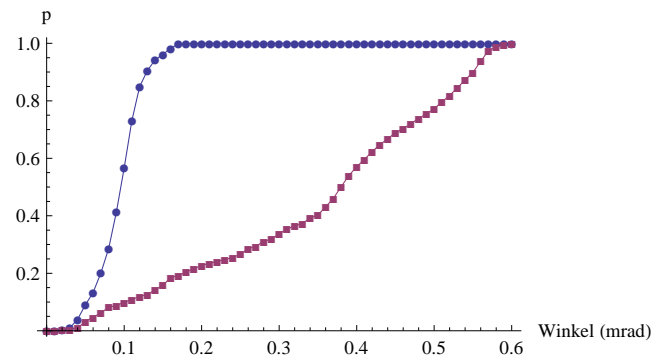


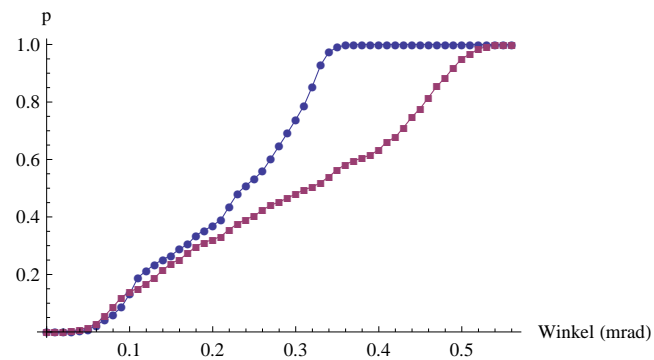
Abbildung 3.12.: Wahrscheinlichkeit $p(\alpha)$ für die Messung mit einer Beaconleistung von $80 \mu\text{W}$ und einer simulierten Störung bei 1 Hz. Es ist zu sehen, dass die Wahrscheinlichkeit für den Fall ohne Regelung (rot) wie zu erwarten linear ansteigt. Für den Fall mit Regelung (blau) steigt die Wahrscheinlichkeit deutlich schneller an. Die aufgetragenen Winkel multipliziert mit 500 m ergeben den Durchmesser D des Teleskops von Bob.



(a) 20 Hz



(b) 50 Hz



(c) 120 Hz

Abbildung 3.13.: Wahrscheinlichkeit $p(\alpha)$ für die Messung mit einer Beaconleistung von $80 \mu\text{W}$ und einer simulierten Störung bei verschiedenen Frequenzen. Wie auch bei der Auswertung der mittleren Ablenkung zu sehen, wird die Regelung bei höheren Frequenzen schlechter und die Wahrscheinlichkeitskurve mit Regelung (blau) nähert sich dem linearen Verlauf der Kurve ohne Regelung (rot) an.

Vorausgesetzt die Frequenzen der simulierten Störungen genügen den Frequenzen der in der Atmosphäre auftretenden Störungen, so lässt sich die Wahrscheinlichkeit für das Treffen eines Teleskops mit festgelegtem Durchmesser D berechnen. Da nicht klar ist, wie groß der Einfluss der Teleskope auf die Leistung der Regelung ist, wurde dieser hier nicht berücksichtigt. So würde zum Beispiel für ein Teleskop mit $D = 5$ cm, ein Scheitelwinkel des Sichtkegels von $\alpha = 0,1$ mrad resultieren. Das heißt bei einer Störung von 50 Hz würden ca. 57 % der Strahlen das Teleskop treffen, ohne Regelung wären es nur ca. 10 % (vgl. Abb. 3.13b).

4. Ausblick und Fazit

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Laserpointingsystem aufgebaut und getestet. Die einzelnen Komponenten sowie das Gesamtsystem wurden charakterisiert.

Das System arbeitet gut auf einer Bandbreite bis 30 Hz bei Störungen in der Größenordnung von 50 bis 70 % des maximal erreichbaren Winkels des Piezos und einer Beaconleistung von $80 \mu\text{W}$.

Die tatsächlichen Winkelfehler eines Lichtstrahls bei der Propagation durch 500 m Atmosphäre sind schwer abzuschätzen. Nach [9] ist eine solche Abschätzung mit Hilfe von Kolmogorovs Arbeit zur homogenen Turbulenz von Flüssigkeiten [10] zwar möglich, jedoch nur, wenn sich der Strahl über einem einheitlichen Gelände befindet, was für die Innenstadt von München nicht der Fall ist.

Sollten diese Winkelfehler jedoch unterhalb der berechneten $0,077 \text{ mrad}$ (Gl. (3.5)) liegen, so ist das momentane System ausreichend. Bei größeren Störungen sollte über zusätzliche Optik in den Alice und Bob Modulen nachgedacht werden, um die maximalen Winkel zu verbessern. Alternativ bieten kommerzielle Piezospiegel bessere Möglichkeiten im Hinblick auf die von ihnen erreichbaren Winkel und Bandbreiten.

Eine weitere Alternative bieten sogenannte Voice Coil Spiegel, welche, statt mit Piezoaktoren, über sich im Magnetfeld einer Spule bewegende Magneten gesteuert werden. Diese Art der Steuerung verspricht laut den Herstellern sehr gute Leistungen hinsichtlich der erreichbaren Winkel und Bandbreiten. So verspricht der OIM101 Einzollspiegel von Optics in Motion eine Auslenkung von $\pm 1,5^\circ$ und das bei einer 3 dB Bandbreite größer 850 Hz, was mehr als 18 mal dem Winkel des verwendeten Piezos entspricht.

A. Versorgung der Quadrantendiode

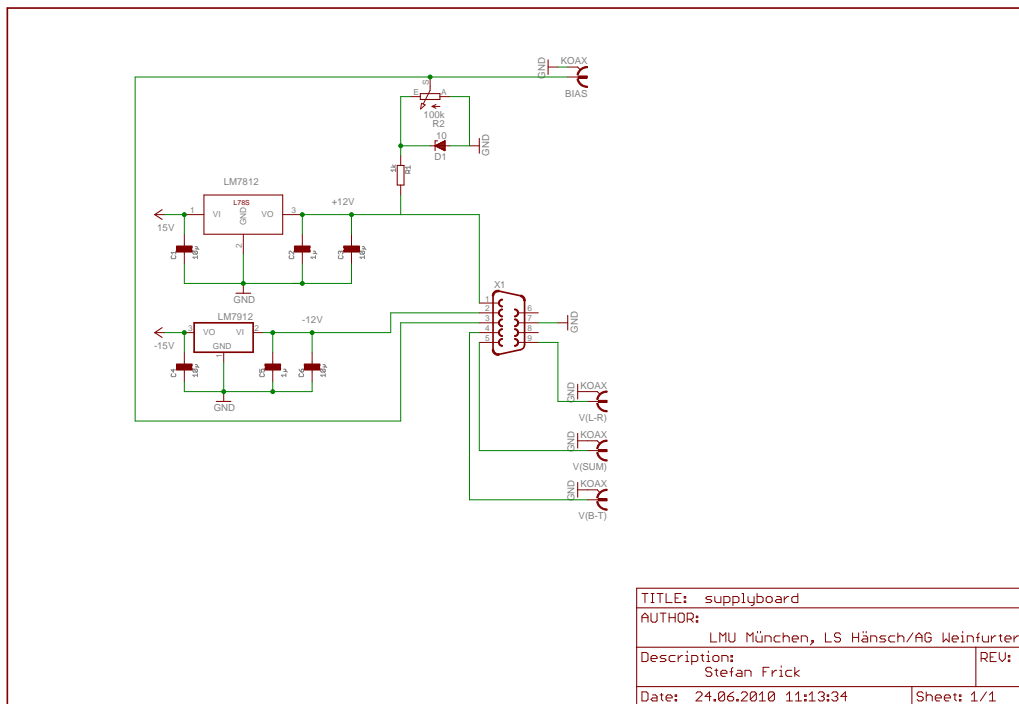


Abbildung A.1.: Schaltplan zur Versorgung der Quadrantendiode. Die Signale der Diode können an den BNC-Buchsen abgegriffen werden.

B. Regler

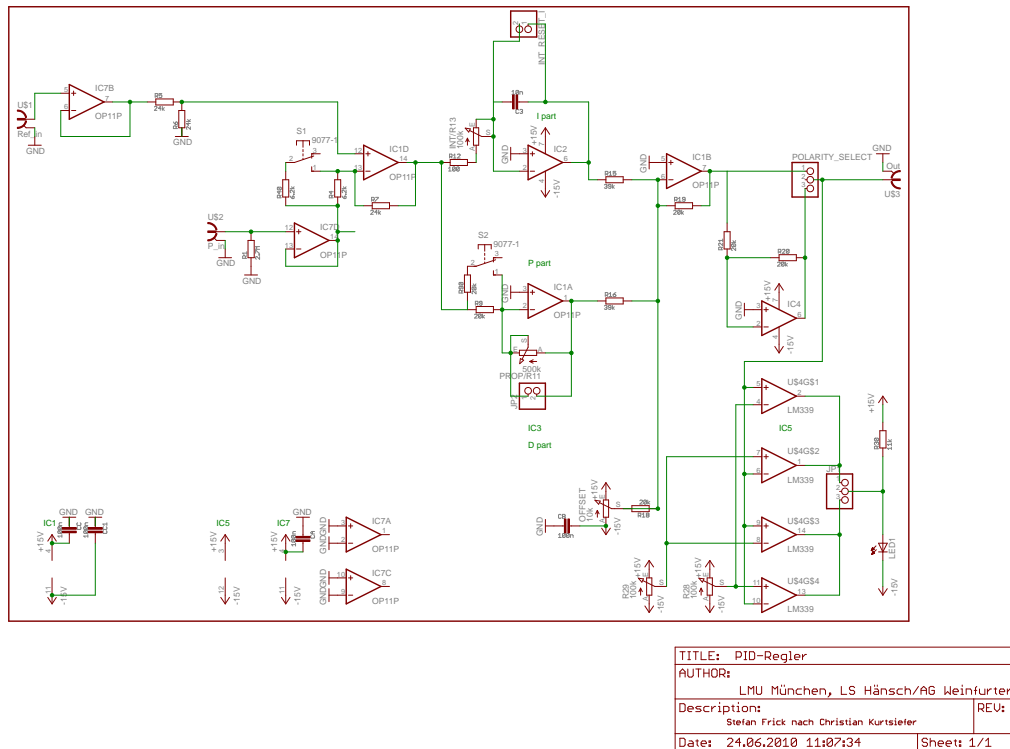


Abbildung B.1.: Schaltplan der verwendeten Regler. Design nach [7]. Zusätzlich kann eine Differenzialteil bestückt werden.

C. Piezospiegel

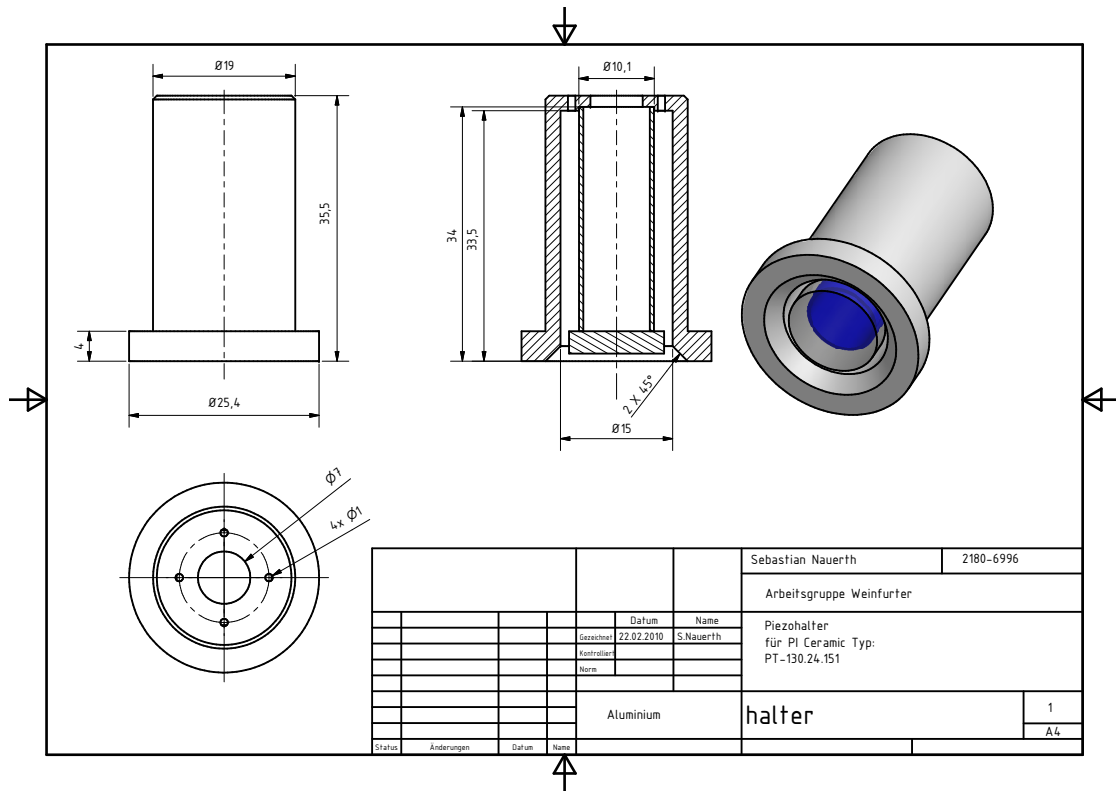


Abbildung C.1.: Zeichnung des kompletten Piezospiegels im Halter.

D. Invertierende OP-Schaltung

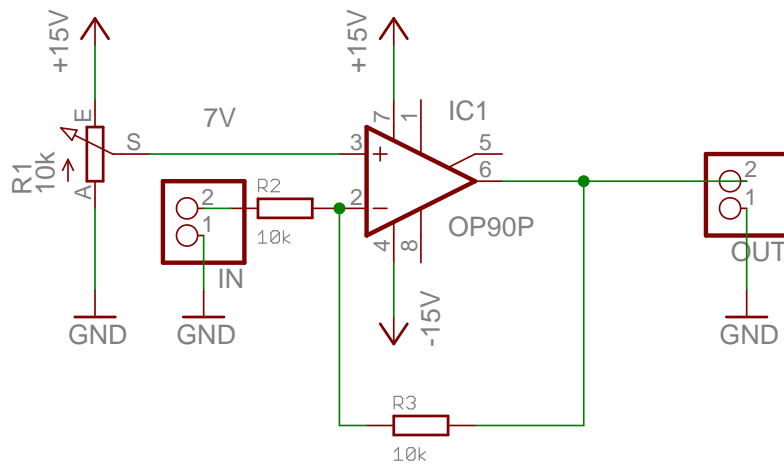


Abbildung D.1.: Invertierende OP-Schaltung. Potentiometer sollte so eingestellt sein, dass 7V abfallen.

Literaturverzeichnis

- [1] Nicolas Gisin. Quantum cryptography. *Rev. Mod. Phys.*, 2002.
- [2] Bennett and Brassard. Quantum cryptography: public-key distribution and coin tossing. *Proc. IEEE Int. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing*, 1984.
- [3] Henning Weier. Free space quantum key distribution: Towards a real life application. *Fortschr. Phys.*, 54, 2006.
- [4] Tobias Schmitt-Manderbach. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km. *Physical Review Letters*, 98, 2007.
- [5] Alfred Böge. *Handbuch Maschinenbau*, volume 18. Vieweg+Teubner, 2007.
- [6] Pacific Silicon Sensor Inc. Pacific silicon sensor series 6 data sheet, 2009.
- [7] Christian Kurtsiefer. Auslegung der Regelschaltung. 5 2000.
- [8] Christian Kurtsiefer. *HV amplifier module for piezo driver*, 1999.
- [9] Tobias Schmitt-Manderbach. *Long distance free-space quantum key distribution*. PhD thesis, 2007.
- [10] Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow. The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers. *C. R. (Doki) Acad. Sci. U.S.S.R.*, 1941.

Erklärung

Mit der Abgabe dieser Bachelor versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

München, den 28.06.2010

Stefan Frick