

# Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie Gehäuse, Phasenstabilisierung, Fasereinbau

Dipl.- Ing. Björnsterne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 21. November 2011 – Letzte Revision: 8. Januar 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Theoretische Quantenkryptografie . . . . .	6
1.1.1	Die Schlüsselübertragung . . . . .	7
1.1.2	Der Quantenkanal . . . . .	8
1.2	Praktische Quantenkryptografie . . . . .	9
1.2.1	Die Phasen- Kodierung . . . . .	10
1.2.2	Die Time- Bin- Kodierung . . . . .	12
1.2.3	Die Implementierung . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Vorbetrachtungen</b>	<b>17</b>
2.1	Bestehende Module der Time- Bin- Konfiguration . . . . .	18
2.1.1	Die Sendeeinheit . . . . .	19
2.1.2	Die Empfangseinheit . . . . .	21
2.2	Realisierende Module der Time- Bin- Konfiguration . . . . .	22
2.2.1	Die Thermobox . . . . .	23
2.2.2	Das Interferometer . . . . .	24
2.2.3	Der Fasereinbau . . . . .	26
2.2.4	Der Piezoelektrische Stabilisator . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Experimentalteil</b>	<b>35</b>
3.1	Analyse der Interferometer 1. Generation . . . . .	35
3.1.1	Die Visibilität . . . . .	36
3.1.2	Die thermische Trägheit . . . . .	40
3.1.3	Die optische Stabilität . . . . .	41
3.2	Synthese der Interferometer 2. Generation . . . . .	42
3.2.1	Die Visibilität . . . . .	43
3.2.2	Die thermische Trägheit . . . . .	45
3.2.3	Die optische Stabilität . . . . .	46

## Literatur

- [AD05] B. Lenk A. Dirks. Quantenkryptografie. Quantenkryptografie, 16. Dezember 2005.
- [GR04] Dirk Holtmannspötter Günter Reuscher. Quantenoptik - Anwendung nichtklassischen Lichts. VDI Technologie Zentrum Düsseldorf, Januar 2004. VDI Technologie Zentrum Düsseldorf.
- [IM02] H. de Riedmatten I. Marcikic. Time- bin entangled qubits for quantum communication created by femtosecond pulses. *Physical Review*, 66:062308–1– 062308–6, 2002.
- [Küh06] Sebastian Kühn. Quantenkryptografie. Wintersemester 2006.
- [Kri07] Jan Krieger. Theoretische Quantenmechanik und Anwendungen. Stoffzusammenfassung und Skript, 1. November 2007.
- [LAF95] F. Farahi L. A. Ferreira, J. L. Santos. Polarization- induced noise in a fiber- optic michelson interferometer with faraday rotator mirror elements. *Applied Optics*, Volume 34, No. 28:6399– 6402, 1995.
- [LM08] Xiao Tang Lijun Ma, Tiejun Chang. Detection- time- bin- shift polarization encoding quantum key distribution system. *Optics Express*, 270.5568 2705565:QWB4.pdf, 2008.
- [NG01] Grégoire Ribordy Nicolas Gisin. Quantum cryptography. *Quant- Physics*, 0101098v2:1– 57, 2001.
- [PDJK02] Humboldt-Universität zu Berlin Professor Dr. Johannes Köbler. Kryptologie I. *Vorlesungsskript*, 26. Juli 2002.
- [Rie10] Robert Riemann. Quantenkryptografie II - Technische Umsetzung. Internet, Humboldt-Universität zu Berlin, 12. Januar 2010.
- [XFM05] Bing Zhu Xiao-Fan Mo. Faraday- michelson system for quantum cryptography. *Optics Letters*, Volume 30, No. 19:2632– 2634, 2005.

## Vorwort

Mit der Quantenkryptografie als Stichwort für die Zukunft beschäftigen sich heutzutage viele Universitäten und Institute infolge des hohen Bedarfs an Möglichkeiten der sicheren Übertragung von Informationen. Der Gleichstand in der technischen Ausrüstung von möglichen Angreifern auf eine Datenübertragung und den Angegriffenen erfordern Mittel, die nicht nur aus Erfahrung als sicher gelten, sondern auch mit wissenschaftlichen Mitteln als sicher, lückenlos und analytisch beschrieben werden können. Die höchste Forderung, das Erkennen eines möglichen Angriffs schon am Schlüssel und nicht erst an der dekodierten Information, kann erst durch die Nutzung der Quantenkryptografie erreicht werden. Die folgende Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereich 787 an der Humboldt- Universität in Berlin erstellt und beschäftigt sich mit der Teilkomplettierung einer schon vorhandenen Quantenkryptografieeinheit.

**Kapitel 1:** Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen der (Quanten)Kryptografie. So wird zuerst allgemein geklärt die Schlüsselübertragung, das One- Time- Pad als zentrale Grundlage und (nicht zuletzt) die Absprachen für die Übertragung und Auswertung inform des BB84- Protokolls. Anschließend wird die technische Realisierung eines Quantenkanals besprochen, die Phasen- Kodierung des Schlüssels als eine der Möglichkeiten. Die Vor- und Nachteile und die Gründe für die weitere Nutzung der Time- Bin- Kodierung.

**Kapitel 2:** Inhalt dieses Kapitels ist eine Vorstellung des bereits vorhandenen Aufbaus der Quantenkryptografieeinheit in der Arbeitsgruppe Nanooptik an der Humboldt- Universität in Berlin. Seit Start dieses Projektes im Jahre 2008 sind bereits viele Vorarbeiten durchgeführt und erste Aufbauten gestaltet worden. Bis zu einer erfolgreichen Demonstration der geplanten Schlüsselübertragung mittels Time- Bin- Konfiguration sind jedoch noch mehrere Detailarbeiten und experimentelle Überprüfungen von Teil- und später des Gesamtsystems nötig. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die zu realisierenden Module vorgestellt und dimensioniert.

**Kapitel 3:** Das Kapitel 3 ist der „praktische“ Teil der in Kapitel 2 aufgeworfenen Fragen und Anforderungen. Dieser Abschnitt teilt sich auf in die Analyse der schon vorhandenen Interferometer und die Synthese der neu aufzubauenden Einheiten. Neben verschiedenen zu beachtenden physikalischen Größen, wie die thermische Trägheit der temperaturstabilisierten Boxen oder die nötige Visibilität, wird auch ein Augenmerk auf die konstruktive Gestaltung der neuen Boxen gelegt, wie die Miniaturisierung im Vergleich zu den recht großen Vorgängermodellen.

Berlin, den 18. November 2011



## 1 Einleitung

Die Kryptografie dient der Geheimhaltung von Informationen und Daten. Neben weiteren Methoden, wie physikalische Maßnahmen unter der Nutzung eines Tresors oder organisatorische wie das Einrichten abgegrenzter Orte, können durch die Kryptografie zusätzliche Schutzmechanismen implementiert werden, wie beispielsweise:

*Vertraulichkeit, Geheimhaltung, Anonymität, Unbeobachtbarkeit, Integrität, Zurechenbarkeit, Authentikation, Unabstreitbarkeit, Identifizierung, Verfügbarkeit, ...* [PDJK02]

Grundsätzlich arbeitet die Kryptografie mit drei weiteren kryptografischen Teilgebieten zusammen [PDJK02]:

- **Kryptologie:** Entwurf und praktische Anwendung von kryptografischen Verfahren.
- **Kryptoanalyse:** Analyse eines kryptografischen Verfahrens, erläutert dessen Eigenschaften.
- **Kryptoanalysis:** Beschreibt die Möglichkeit eines Angriffs gegen ein Kryptoverfahren.

Für die praktische Implementierung einer Quantenkryptografieeinheit sind Kenntnisse dieser drei Teilgebiete nötig - **Aufbau, Anwendung, Analyse und Angriff** sind essentielle Eckpunkte in der Praxis.

## 1.1 Theoretische Quantenkryptografie

Eine Möglichkeit Informationen verschlüsselt zu übertragen, ist die Nutzung eines *One- Time- Pads*. Dies stellt ein symmetrisches polyalphabetisches *Substitutionsverfahren* dar, bei dem bitweise eine Modulo- 2- Verknüpfung zwischen *Schlüssel* und Klartext durchgeführt wird. Daher sind bei einer nicht autorisierten Dechiffrierung unübersehbar viele „falsche“ Klartextvarianten entschlüsselbar. Das Sicherheitsprinzip des *OTP* umfasst vier Punkte:

- **Schlüssellänge:** Die Schlüssellänge ist gleich der Klartextlänge.
- **Schlüsselverwendung:** Grundsätzliche, unbedingte einmalige Verwendung des Schlüssels.
- **Schlüsselart:** Es liegt ein absolut stochastischer Schlüssel vor.
- **Schlüsselgeheimnis:** Der Schlüssel ist das Geheimnis, nicht der Verschlüsselungsalgorithmus.

Damit erfüllt das *OTP* das Kerckhoff- Prinzip und ist informationstheoretisch sicher. Jedoch stellt die Schlüsselübertragung eine praktische Schwachstelle des *One- Time- Pads* dar. Hier bietet sich die Nutzung der *Quantenkryptografie* an.

Die Quantenkryptografie als Teilgebiet der *Quanteninformatik* ist eine Möglichkeit der informationstheoretischen Schlüsselgenerierung und -übertragung. Das Sicherheitsprinzip des *OKD* fußt auf zwei physikalisch fundierten und begründeten Punkten:

- **Quantenmechanisches Messproblem:** Einer *beobachtenden* Person ist es unmöglich bei der Messung eines *Quantenzustandes* diesen nicht zu ändern und auch diese Änderung rückgängig zu machen.
- **No- Cloning- Theorem:** Die Unmöglichkeit ein *QuBit* auf ein anderes zu kopieren ohne das originale *QuBit* zu verändern.

Werden Informationen übertragen, besteht die Notwendigkeit eines *Übertragungsprotokolls*. Dieses wiederum ist abhängig von der Art des Informationsträgers, hier das Photon. Die Nutzung des Photons kann in einem *Einteilchen- System* erfolgen oder als *verschränkter* Zustand.

Für aufzubauende Quantenkryptografieeinheit wird ein Einteilchen- System realisiert unter Verwendung des *BB84-Protokolls*.

### 1.1.1 Die Schlüsselübertragung

Im Jahr 1984 entwickelten Charles Bennett und Giles Brassard ein Protokoll zur Schlüsselübertragung in einem Einteilchen- System. Das Protokoll kommuniziert über zwei voneinander getrennte Kanäle, einem Quantenkanal für die Schlüsselgenerierung und ein klassischer Kanal, wie Telefon oder LAN zum Zweck einer anschließenden Schlüsselverifikation. [Küh06]

Die Generierung und Verifikation des Schlüssels über das BB84- Protokoll in allgemeiner Anwendung:

1. Grundlage sind polarisierte Photonen mit  $0^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $135^\circ$ .

*Kommunikation über den Quantenkanal:*

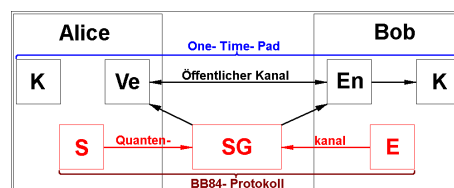
2. Alice sendet polarisierte Photonen aus und protokolliert.
3. Bob stellt zufällig eine *Basis* ein, misst und protokolliert.

*Kommunikation über den klassischen Kanal:*

4. Alice und Bob vergleichen, streichen Verluste und Werte mit verschiedenen Basen.
5. Alice und Bob entnehmen dem vorliegenden Sifted- Key einen kleinen Teil.
6. Alice und Bob vergleichen die QuBit auf *Gleichheit*. Eine tolerierbare Fehlerrate liegt vor bei einem Anteil fehlerhafter Bits von  $\leq 11,25\%$ . Daraus folgt, der Schlüssel ist sicher, ein Secret- Key liegt vor.

Ein Lauschangriff wird vermutet und erkannt bei einem Anteil fehlerhafter Bits von  $> 11,25\%$ . Der Schlüssel ist unsicher und muss verworfen werden.

Der prinzipielle Aufbau einer Quantenkryptografieeinheit für die Schlüsselgenerierung, Schlüsselübertragung und des chiffrierten Klartextes ist nun festgelegt und kann grafisch dargestellt werden.



Der prinzipielle Aufbau einer Quantenkryptografieeinheit

(**K** = Klartext, **S** = Sender, **E** = Empfänger, **Ve** = Verschlüsselung, **En** = Entschlüsselung, **SG** = Schlüsselgenerierung).

Die in der Abbildung **rot** dargestellten Module und dessen photonischen Komponenten sind praktisch aufzubauender Inhalt der vorliegenden Arbeit.

### 1.1.2 Der Quantenkanal

Technisch, praktische Möglichkeiten der Schlüsselübertragung, notwendige (photonische) Bauelemente und das experimentelle Vorgehen sind in verschiedener Literatur bereits ausführlich beschrieben. Grundlage und konstruktive Randbedingungen aufzubauender Interferometer sind die Erkenntnisse und Anforderung aus [NG01]. In Abschnitt **B** „Quantum channels“ ist der Aufbau eines Quantenkanals unter Anwendung von Glasfasern beschrieben. Die Nutzung der Wellenlänge bei  $1,5\mu\text{m}$  für die Schlüsselübertragung (der eigentliche Quantenkanal) sowie  $1,3\mu\text{m}$  für eine interne Kommunikation zwischen Sender und Empfänger (z. B. zwecks Synchronisation) sind dort begründet (Fenster minimaler Dämpfung). Der Einsatz von Single- Mode- Fasern für vorgesehene große Übertragungstrecken und die dann unweigerlich auftretenden Polarisierungseffekte, wie die Polarisationsdispersion, sind ausführlich beschrieben. Diese Art der Dispersion erzwingt auch den Umstieg von der Nutzung der Polarisation als Kodierung im BB84- Protokoll hin zum Einsatz der Phase und dessen Möglichkeiten der Beeinflussung innerhalb einer Glasfaser.

Zusammengefasst ergeben sich folgende während des Aufbaus zu beachtende technische Randbedingungen:

- **Quantenkanal:** Realisiert in einer Single- Mode- Faser bei  $1,5\mu\text{m}$ .
- **Transport:** Realisiert durch Einzelphotonen.
- **Protokoll:** Realisiert über das BB84- Protokoll.
- **Kodierung:** Realisiert durch *Phasenkodierung*.
- **Verschlüsselung:** Realisiert über ein One- Time- Pad.



## 1.2 Praktische Quantenkryptografie

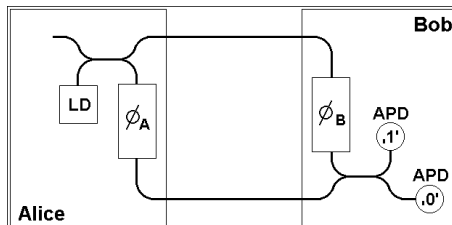
Die technische Realisierung eines Quantenkanals soll nun im Folgenden erläutert werden. Dabei wird nicht auf die Erzeugung einer (echten) Zufallszahlenkolonne eingegangen werden, sondern das Augenmerk richtet sich auf die Übertragung des Schlüssels selbst. Da der Schlüssel genau so lang sein muss, wie die zu übertragende Nachricht groß ist, wird klar, dass der informationslogistische Aufwand für den Schlüsseltransport vom Sender zum Empfänger enorm sein kann.

Da jede Information aus Träger und Datum besteht, verknüpft über geeignete Modulation, wird in den folgenden Abschnitten auf mögliche *Kodierungen* des Schlüssels während deren Übertragung im Quantenkanal eingegangen.

1.2.1 Die Phasen- Kodierung

[NG01]

Für den Aufbau eines die Phasen- Kodierung nutzenden Systems ist das Prinzip des Mach- Zehnder- Interferometers unter Nutzung von Glasfasern, die zu betrachtende Konfiguration. Bestehend aus zwei symmetrischen Faserarmen mit eingebauten Phasenmodulatoren, zwei 50/50- Kopplern, zwei Laserdioden und 2 APDs[GR04]. Der prinzipielle Aufbau ist im folgenden Abbild aufgezeigt.



Der prinzipielle Aufbau eines phasenkodierenden Systems unter Nutzung eines Mach- Zehnder- Interferometers auf Glasfaserbasis (LD = Laserdiode, phi = Phasenmodulator, APD = AValance- Fotodiode). [Rie10]

Durch diesen Aufbau kann der Sender mittels Laserdiode Licht in das System einspeisen und durch den Modulator dessen Phase verändern. Der Empfänger kann vor der Detektion an seinem Modulator ebenfalls die Phase des ankommenden Lichts manipulieren. Mittels dieser Konfiguration ist eine Schlüsselübertragung unter Nutzung des BB84- Protokolls möglich.

Alice		Bob		APD		Alice+Bob
sendet	mit	stellt ein	erwartet	misst	Raw- Key	Sifted- Key
1	0	0	1	0	1	1
1	0	$\pi/2$	0	$-\pi/2$	?	
1	0	$\pi$	1	$-\pi$	0	
1	0	$3\pi/2$	0	$-3\pi/2$	?	
0	$\pi/2$	0	1	$\pi/2$	?	
0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0	1	
0	$\pi/2$	$\pi$	1	$-\pi/2$	?	
0	$\pi/2$	$3\pi/2$	0	$-\pi$	0	0
1	$\pi$	0	1	$\pi$	0	
1	$\pi$	$\pi/2$	0	$\pi/2$	?	
1	$\pi$	$\pi$	1	0	1	1
1	$\pi$	$3\pi/2$	0	$-\pi/2$	?	
0	$3\pi/2$	0	1	$3\pi/2$	?	
0	$3\pi/2$	$\pi/2$	0	$\pi$	0	0
0	$3\pi/2$	$\pi$	1	$\pi/2$	?	
0	$3\pi/2$	$3\pi/2$	0	0	1	
QuBit	$\phi_A$	$\phi_B$	QuBit	$\Delta\phi$	QuBit	QuBit

Implementierung des BB84- Protokolls mittels Phasen- Kodierung. [NG01] [Rie10]

Mit der Voraussetzung, dass die Kohärenzlänge des verwendeten Laserlichts größer als der Längenfehler  $\Delta L$  der beiden Fasern untereinander ist, kann man Interferenzen am Detektor aufnehmen. Die gemessene Intensität an der APD „0“ kann beschrieben werden durch: [NG01] [Rie10]

$$I = I_m \cdot \cos^2 \left( \frac{\phi_A - \phi_B + k \cdot \Delta L}{2} \right) \tag{1}$$

Wobei  $I_m$  die mittlere optische Laserleistung darstellt. Ist das gemessene  $I$  minimal, was dem Bit „0“ entspricht, liegt destruktive Interferenz vor. Bei konstruktiver Interferenz wird das Bit „1“ detektiert.

Unter der Annahme, dass  $\Delta L = 0$  wäre, lässt sich vereinfachen:

$$I \propto \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2)$$

So ist nun leicht zu erkennen, dass am Detektor „0“ das Bit „0“ anliegt, wenn  $\Delta\phi = \pi/2 + n \cdot \pi$  gilt und Bit „1“ bei  $\Delta\phi = n \cdot \pi$  mit  $n \in \mathbb{Z}$ . Dazwischen kann der detektierten Intensität kein eindeutiges Bit zugeordnet werden. Für die Anpassung an das BB84-Protokoll wird letztendlich festgelegt, dass die Modulatoren nur eine begrenzte Anzahl an Phasenverschiebungen ermöglichen. So soll gelten  $\phi_A = \phi_B = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ . Konsequenz ist, dass das Bit „0“ nun erkannt wird, wenn  $\Delta\phi = \pm\pi$  annimmt und Bit „1“ bei  $\Delta\phi = \pm 0$ .

Die in der Tabelle „Implementierung des BB84-Protokolls mittels Phasen-Kodierung“ beschriebene Implementierung des BB84-Protokolls, gleichverteilt für  $\phi_A$  und  $\phi_B$  genutzt, ergibt den „Raw-Key“ aus der Quantenkryptografie.

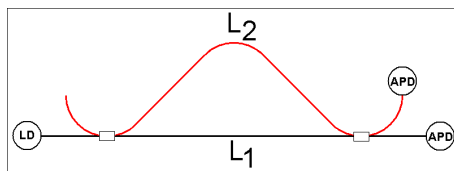
Ein bei der praktischen Umsetzung auftretendes großes Problem ist die Forderung, dass die Wegstrecken beider Glasfasern keine veränderliche Differenz  $\Delta L$  besitzen dürfen, durch zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit der Faserlängen auf der gesamten Übertragungsstrecke. Diese Schwierigkeit, der Erhalt der Phasenbedingung für ein Mach-Zehnder-Interferometer über große Distanzen, kann durch die Nutzung der Time-Bin-Kodierung gelöst werden.

1.2.2 Die Time- Bin- Kodierung

[Rie10] [NG01]

Grundidee, die Empfindlichkeit der phasenkodierten Übertragung eines Schlüssels von der veränderlichen Längendifferenz  $\Delta L$  beider Fasern, zwischen Alice und Bob zu umgehen, ist eine Nutzung der *Time- Bin- Kodierung*. Dabei werden zwei Mach- Zehnder- Interferometer in die den Quantenkanal bildende Faser eingeschleift und eine entstehende Phasendifferenz  $\Delta\phi$  ermöglicht die Übertragung der Schlüsselinformation unabhängig von einem möglichen  $\Delta L$  der Faser.

Zuerst wird ein einzelnes faserbasiertes Interferometer beschrieben. Die Time- Bin- Kodierung ist eine Technik, die in der Quanteninformatik verwendet wird, um ein QuBit an Informationen über ein Photon zu kodieren. Die Time- Bin- Kodierung ist eine sehr robuste Technologie. Bei der Time- Bin- Kodierung wird ein einzelnes Photon durch ein Mach- Zehnder- Interferometer gesendet. Einer der beiden Fasern ist verlängert. Der Unterschied in der Weglänge beider Fasern ist länger als die Kohärenzlänge der Photonen. Dadurch wird sichergestellt, dass wenn ein bestimmter Pfad genommen wird, dieser eindeutig unterschieden werden kann. Das Interferometer ist für eine bestimmt gewählte Phase gestaltet, was bedeutet, dass eine (temperaturbedingte) Längenänderung des Interferometers während des Photonaustauschs unter der Wellenlänge des Lichts bleiben muss. Dies erfordert eine *aktive Temperaturstabilisierung* [NG01] des Mach- Zehnder- Interferometers.



Grundprinzip eines Single- Time- Bin- Interferometers (LD = Laserdiode, APD = Lawinenfotodiode).

Nimmt das Photon den kurzen Weg  $L_1$ , wird dies bezeichnet als Zustand  $|0\rangle$ , wenn es den langen Weg nimmt  $L_2$ , dann als Zustand  $|1\rangle$ . Wenn das Photon beide Wege durchläuft, dann bezeichnet dies eine kohärente Überlagerung der einzelnen Zustände:

$$|\psi\rangle = \alpha \cdot |0\rangle + \beta \cdot |1\rangle \tag{3}$$

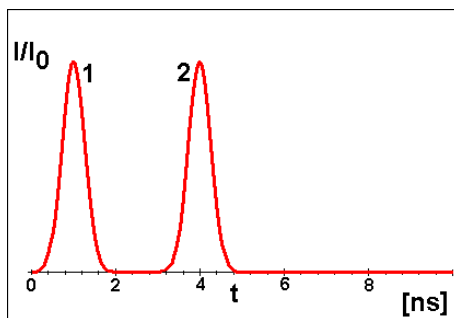
mit [AD05]

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{4}$$

Diese kohärente Überlagerung der beiden möglichen Zustände wird als QuBit bezeichnet. Im Allgemeinen ist es leicht, den Phasenunterschied  $\phi$  zu steuern zwischen den beiden Interferometerarmen, die das Photon nehmen kann. Sehr viel schwieriger ist es, *die Amplituden konstant zu halten* [NG01]. Das so erstellte QuBit kann nun beschrieben werden *durch*: [IM02]

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |0\rangle + \frac{e^{j \cdot \phi}}{\sqrt{2}} \cdot |1\rangle \tag{5}$$

Photonenverluste sind leicht erkennbar, da das Fehlen von Photonen einem nicht zulässigen Zustand entspricht, daher ist diese Art der Kodierung besser geeignet, als z. B. eine photonennummerbasierte Kodierung.

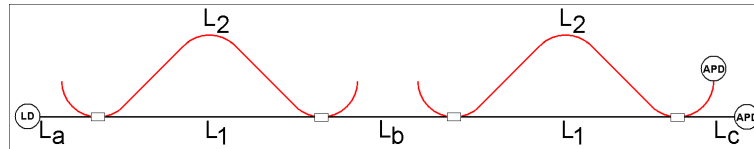


Wirkung auf ein gesendeten Impuls unter Nutzung des Time- Bin- Konfiguration. Das Signal spaltet sich auf in zwei Peaks (1),(2). [LM08]

Durchläuft ein Photon eine Time- Bin- Konfiguration, sind am Ausgang bei der Detektion zwei Pulse zu erkennen, dessen *Ankunftszeit* sich durch die Längendifferenz der Interferometerarme errechnet.

$$\Delta t = \frac{n}{c} \cdot (L_2 - L_1) \quad (6)$$

Zwischen beiden Peaks gibt es keine Abhängigkeiten, so dass mögliche Amplitudenunterschiede sich lediglich aus der Faserdämpfung ergeben, solange die Wahrscheinlichkeiten  $\alpha$  und  $\beta$  gleich sind. Eine Beeinflussung der Amplituden bzw. der zu detektierenden Intensitäten ergibt sich erst mit der Nutzung des zweiten in Reihe geschalteten Interferometers.



Time- Bin- Konfiguration mit zwei Mach- Zehnder- Interferometer  
(LD = Laserdiode, APD = Lawinenfotodiode).

Misst man diese Anordnung aus, sind nun drei Pulse am Detektor zu ermitteln. Die beiden äußeren Peaks (Satelliten) sind symmetrisch um ein zentrales Maximum (Zentralpeak) angeordnet, welches außerdem eine größere Intensität erkennen lässt. Im Zentralpeak ist die Wirkung beider Mach- Zehnder- Interferometer über die Phase korreliert. Die zeitliche Abhängigkeit der seitlichen Satelliten untereinander ist nun gegeben mit:

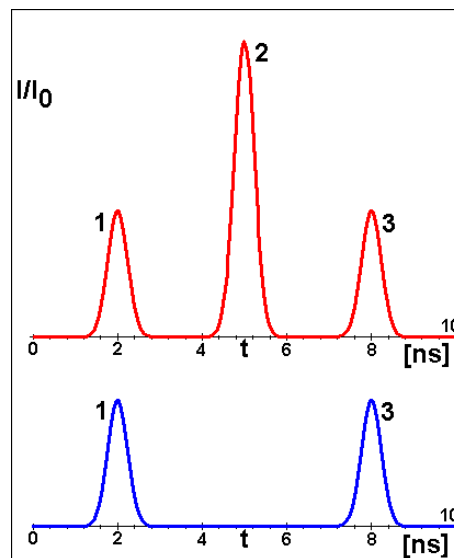
$$\Delta t = 2 \cdot \frac{n}{c} \cdot (L_2 - L_1) \quad (7)$$

Daraus wiederum ist eine Phasenverschiebung errechenbar, nur aus dem Längenunterschied  $\Delta L$  heraus, zwischen Satellit und Zentralpeak:

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{n}{\lambda} \cdot (L_2 - L_1) \quad (8)$$

Gesamt zwischen den Satelliten:

$$\Delta\phi = 4\pi \cdot \frac{n}{\lambda} \cdot (L_2 - L_1) \quad (9)$$



Wirkung der Time- Bin- Kodierung auf ein gesendeten Impuls.  
Dieser teilt sich auf in Vorsatellit(1), Zentralpeak(2)- und Nachsatellit(3).  
Bei **destruktiver Interferenz** wird der Zentralpeak nicht im Messbild erscheinen, bei **konstruktiver Interferenz** ist dieser deutlich erhöht. Mit (2) ist die Übertragung einer Information möglich.

Die *optischen Leistungen* der einzelnen Pulse ist berechenbar durch die Überlagerung der einzelnen Zustandsgleichungen, angepasst an die drei möglichen Pfade, die das Photon durchlaufen kann: [Kri07] [LAF95] [XFM05]

$$P(\psi_{(k,m,t)}) = |\langle\psi|\psi_1\rangle|^2 \quad (10)$$

Wobei  $k$  den kürzesten  $m$  den mittleren und  $l$  den längsten Pfad bezeichnet. Damit ergibt sich für die optischen Leistungen  $P$ :

- **Kurzer Weg**  $\equiv$  Satellit (1):

$$P(\psi_1) = 1 \tag{11}$$

- **Mittlerer Weg**  $\equiv$  Zentralpeak (2):

$$P(\psi_2) = 4 \cdot \cos^2 \frac{\phi}{2} \tag{12}$$

- **Langer Weg**  $\equiv$  Satellit (3):

$$P(\psi_3) = 1 \tag{13}$$

Mit Peak 2, dem Zentralpeak, ist eine Informationsübertragung möglich. Die Implementierung des BB84- Protokolls über die Time- Bin- Konfiguration kann dann erfolgen, wenn im langen Pfad eines jeden Interferometerarms ein Phasenmodulator eingeschleift wird.

$$P(\psi_2) \propto \cos^2 \frac{\phi_{\text{Alice}} + \phi_{\text{Bob}}}{2} \tag{14}$$

Unter der Annahme, dass Alice vier Phasenwerte einstellen kann  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  und Bob die Phasenwerte  $0, \pi/2$  als Basis nutzt, ergibt sich ein BB84- Protokoll in Time- Bin- Konfiguration.

Alice		Bob		APD		Alice+Bob
sendet	mit	stellt ein		misst	Raw- Key	Sifted- Key
1	0	0		0	1	1
1	0	$\pi/2$		$\pi/2$	?	
0	$\pi/2$	0		$\pi/2$	?	
0	$\pi/2$	$\pi/2$		$\pi$	0	0
1	$\pi$	0		$\pi$	0	
1	$\pi$	$\pi/2$		$3\pi/2$	?	
0	$3\pi/2$	0		$3\pi/2$	?	
0	$3\pi/2$	$\pi/2$		$2\pi$	1	
QuBit	$\phi_A$	$\phi_B$		$\Delta\phi$	QuBit	QuBit

Implementierung des BB84- Protokolls mittels Time- Bin- Kodierung

### 1.2.3 Die Implementierung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 787 an der Humboldt- Universität in Berlin werden Erkenntnisse der theoretischen Quantenkryptografie in die Praxis umgesetzt, indem notwendige Baugruppen erstellt und implementiert werden. So wird sich in der Arbeitsgruppe NANO beschäftigt mit:

- **Einzelphotonenquellen:** Die Herstellung robuster, langlebiger, kompakter und zuverlässiger Einzelphotonenquellen unter anderen auf Telekom- Wellenlängen für den Einsatz unter Normalbedingungen.
- **Nanophotonische Strukturen:** Die Integration von optischen Bauelementen, wie Wellenleiter, Strahlteiler, Resonatoren und Einzelphotonenquellen in Halbleiterchips.
- **Elektronik:** Aufbau ultraschneller Elektronik zur Umsetzung des BB84- Protokolls und Auswertung der detektierten Signale in Time- Bin- Konfiguration. Die Umsetzung erfolgt einerseits in der Nutzung komplexer Elektronik- Setups, sowie von FPGA- Chips.
- **Software:** Programmierung der Kommunikation über den klassischen Kanal zwecks Abgleich der Messbasen und Algorithmen zur Erhöhung der Sicherheit.
- **Interferometer, faserbasiert:** Die Kodierung im BB84- Protokoll wird über die Phase eines Photons in der Time- Bin- Konfiguration implementiert. Die schon vorhandene Infrastruktur der 1, 5 $\mu$ m- und 1, 3 $\mu$ m- Glasfasernetze soll genutzt werden, um nicht durch die Schranken freiraumoptischer Übertragung begrenzt zu sein und um den Übertragungsweg für das BB84- Protokoll transparent gestalten zu können. Neben der Planung und Herstellung einer temperaturstabilisierten Umgebung in dem Sende- und Empfänger- Interferometer eingebaut werden, sind aktive Elemente der Phasenstabilisierung zu planen.

Vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit folgenden Fragestellungen aus den vorhergehend genannten Gebieten der Forschungsbereiche der Arbeitsgruppe NANO:

- Planung und Dimensionierung der Schnittstellen zu der schon vorhanden Infrastruktur für den Betrieb der faserbasierenden Interferometer.
- Aufbau und Konstruktion einer temperaturstabilisierten Umgebung.
- Einbau faseroptischer Elemente nach Vorgaben der Arbeitsgruppe und Konstruktion von modular aufgebauten Interferometern.
- Kontrolle der Wirksamkeit der temperaturstabilisierten Umgebung und Vorschlag zusätzlicher, notwendiger Stabilisierungsmaßnahmen, wie:
- Aufbau eines Proto- Regelkreises zur Stabilisierung der optischen Ausgangsleistung der Interferometer in Time- Bin- Konfiguration. Nachweis der Wirksamkeit und Konstruktionsvorschläge für die zukünftige Implementierung.
- Zuarbeit der notwendigen Randbedingungen und Schnittstellen zu nachfolgenden Gruppen die sich mit weiteren Aufbauten zum Betrieb der faserbasierenden Interferometern im Rahmen quantenkryptografischer Experimente beschäftigen.

Die vorliegende Arbeit wird sich daher weitgehend mit den Themen (temperaturstabilisiertes) **Gehäuse**, dem **Fasereinbau** und der Gestaltung von optischen, wie auch elektronischen Modulen zwecks **Phasenstabilisierung** beschäftigen.





## 2 Vorbetrachtungen

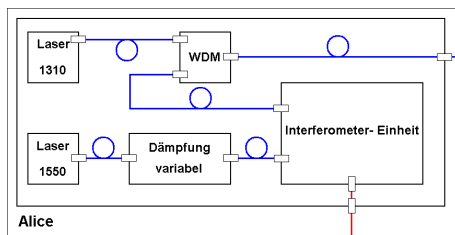
Inhalt dieses Kapitels ist eine Vorstellung des bereits vorhandenen Aufbaus der Quantenkryptografieeinheit in der Arbeitsgruppe Nanooptik an der Humboldt- Universität in Berlin. Seit Start dieses Projektes im Jahre 2008 sind bereits viele Vorarbeiten durchgeführt und erste Aufbauten gestaltet worden. Bis zu einer erfolgreichen Demonstration der geplanten Schlüsselübertragung mittels Time-Bin- Konfiguration sind jedoch noch mehrere Detailarbeiten und experimentelle Überprüfungen von Teil- und später des Gesamtsystems nötig.

## **2.1 Bestehende Module der Time- Bin- Konfiguration**

Die geplante Quantenkryptografieeinheit in Time- Bin- Konfiguration wurde durch diverse Vorarbeiten bereits in ihren Modulen gestaltet. Ziel der nächsten Kapitel ist es die Sende- und Empfangseinheit vorzustellen.

### 2.1.1 Die Sendeeinheit

Der Sender der Quantenkryptografieeinheit besteht aus insgesamt 5 Modulen, welche bis auf das Interferometer aus kommerziell erhältlichen Bauelementen bestehen.



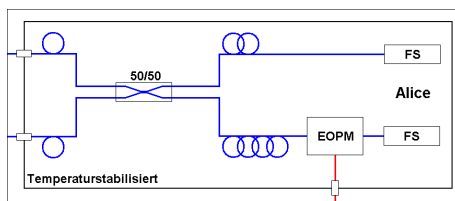
Der prinzipielle Aufbau des Senders einer Time- Bin- Quantenkryptografieeinheit (blau = optische, rot = elektrische Übertragung).

Wobei die Kombination „Laser 1550nm“ mit dem Modul „Dämpfung variabel“ eine noch nicht erhältliche Einzelphotonenquelle simulieren soll und der „Laser 1310nm“ zu einer Kommunikation zwischen Sende- und Empfangseinheit genutzt wird, wie auch als Trägersignal für einen aufzubauenden Regelkreis.

Aufgabe im weiteren Verlauf ist die Konstruktion, der Aufbau und die Charakterisierung der in der Abbildung dargestellten „Interferometer- Einheit“.

Die Interferometereinheit besteht aus zwei großen Teilen. Der Thermobox, welche die nötige Stabilisierung der Temperatur darstellen soll und das eigentliche Interferometer.

**Temperaturstabilisierte Interferometerbox:** Es besteht eine starke Abhängigkeit der Phase  $\phi$  von der Temperatur in der Time- Bin- Konfiguration. Um eine hohe Phasenkonstanz zu gewährleisten, werden die Interferometer temperaturstabilisiert. So wird erreicht, dass optische Weglängenänderungen  $\Delta L$ , sowie Änderungen des Faserkernbrechungsindex  $dn/dT$  keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf die Phase haben.



Der prinzipielle Aufbau des Send- Interferometers einer Time- Bin- Quantenkryptografieeinheit (blau = optische, rot = elektrische Übertragung)

FS = Faraday- Spiegel, EO(P)M = elektrooptischer (Phasen)Modulator  
jetzt ausgeführt als Michelson- Interferometer.

Während die Gehäuse der zwei verwendeten Thermoboxen Inhalt vorliegender Arbeit sind, ist die elektronische Regelung, wie auch der mechanische Aufbau des Reglers innerhalb einer anderen Arbeit realisiert worden. Es wurden wärmedynamische Eigenschaften der vorliegenden Boxen hergeleitet und ermittelt. So besitzt jede Box folgende zu beachtende Charakteristika, wie die thermische Verlustleistung  $P$  gleich dem Wärmestrom  $\dot{Q}$  aus oder in die Box, der Temperaturgradient  $\nabla T$  innerhalb des Interferometers, das Temperaturgefälle  $\Delta T$  zwischen Interferometerbox und Umwelt, das maximal zulässige Temperaturgefälle innerhalb des Interferometers  $\Delta T_{\varphi;Max}$  und das *Stabilitätsfenster* des Interferometers:

$$t_{\varphi} = \frac{\dot{Q}}{V} \cdot \frac{\Delta T_{\varphi;Max}}{(c_I \cdot N_I + c_{II} \cdot (1 - N_I)) \cdot (\rho_I \cdot N_I + \rho_{II} \cdot (1 - N_I))} \quad (15)$$

Es bezeichnet die maximale Zeit, in der die Interferometer phasentreu arbeiten ohne aktive Temperaturstabilisierung. Bei den vorliegenden Aufbauten, welche etwa aus 2% Kupfer bestehen der Rest Luft, beträgt  $t_{\varphi;Max}$  in etwa 8 Sekunden. Will man diese Zeit vergrößern, ist es nötig die thermische Trägheit des Interferometers zu erhöhen. Dies kann unter anderen erreicht werden, indem der Anteil des Kupfers maximiert wird. Der Anteil an Kupfer  $N_{I;Opt}$  in der die thermische Trägheit optimal wird, ist ermittelbar über:

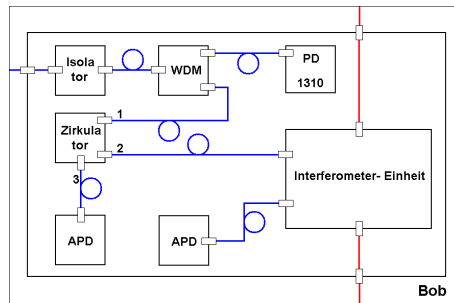
$$N_{I;Opt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2 \cdot c_{II} \cdot \rho_{II} - c_I \cdot \rho_{II} - c_{II} \cdot \rho_I}{(c_I - c_{II}) \cdot (\rho_I - \rho_{II})} \quad (16)$$

Wird dieser Anteil beim Aufbau der Interferometer eingehalten, wird die Trägheit maximal, eine noch weitere Erhöhung ist nicht ohne Änderung anderer Randbedingungen möglich. Für die vorliegenden Interferometer beträgt  $N_{I;Opt}$  etwa 80%. Das maximale Stabilitätsfenster beträgt dann 2,6 Minuten. Dieser Wert ist über  $t_{\varphi;Max}$  direkt ermittelbar mit den vorhandenen Stoffdaten der Interferometerkonstruktion:

$$t_{\varphi;Max} = \frac{\Delta T_{\varphi;Max}}{4} \cdot \frac{V}{\dot{Q}} \cdot \frac{(c_{II} \cdot \rho_I - c_I \cdot \rho_{II})^2}{(c_{II} - c_I) \cdot (\rho_I - \rho_{II})} \quad (17)$$

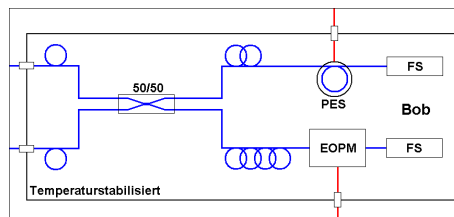
### 2.1.2 Die Empfangseinheit

Der Empfänger der Quantenkryptografieeinheit besteht aus insgesamt 7 Modulen, welche bis auf das Interferometer aus kommerziell erhältlichen Bauelementen bestehen. Für die Detektion der Wellenlänge 1310nm wird eine Photodiode verwendet, für die Auswertung der QuBits auf dem Quantenkanal mit 1550nm 2x APDs. Das Einschleifen des Zirkulators ist notwendig, da die Interferometereinheit nicht als Mach-Zehnder-Interferometer ausgeführt wird, sondern als Michelson-Interferometer.



Der prinzipielle Aufbau des Empfängers einer Time-Bin-Quantenkryptografieeinheit (blau = optische, rot = elektrische Übertragung).

**Interferometereinheit:** Das Interferometer der Empfangseinheit besteht aus zwei Teilen. Der umhüllenden Thermobox, welche die nötige Stabilisierung der Temperatur darstellen soll und das eigentliche Interferometer. Inhalt des Interferometers sind die gleichen optischen und optoelektronischen Bauelemente wie bei der Sendeeinheit. Der einzige Unterschied liegt im *Piezoelastischen Stabilisator*, welcher in einem Interferometerarm eingebaut ist.



Der prinzipielle Aufbau des Empfänger-Interferometers einer Time-Bin-Quantenkryptografieeinheit (blau = optische, rot = elektrische Übertragung)

FS = Faraday-Spiegel, EO(P)M = elektrooptischer (Phasen)Modulator,

PES = piezoelektrischer Stabilisator

jetzt ausgeführt als Michelson-Interferometer.

**Piezoelastischer Stabilisator:** Der Piezoelektrische Stabilisator *PES* gehört zur Gruppe der im Rahmen dieser Arbeit zu realisierenden Aufbauten und wird in den folgenden Kapiteln ausführlich behandelt.

## 2.2 Realisierende Module der Time- Bin- Konfiguration

Innerhalb des hier zu bearbeitenden Themas „Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie“ sind drei physisch unterscheidbare Einheiten zu realisieren. Das Gehäuse, aufteilbar in die Thermobox und das Interferometergehäuse selbst, die Phasenstabilisierung im engeren Sinne der Piezoelektrische Stabilisator PES mit dessen Ansteuerung bzw. Regelung und letztendlich der Fasereinbau, das Design der Faser mit dem Hauptaugenmerk an Wellenlänge, Dämpfung und Störempfindlichkeit, kurz, die Verlegung innerhalb des Interferometergehäuses.

Hauptziel des Aufbaus der neuen Interferometer (Interferometer der 2. Generation genannt) ist es, das *Bitfehler- Verhältnis* bei der Übertragung von Informationen gering zu halten. Wichtig dabei ist es zu wissen, dass dieses Verhältnis direkt von der *Visibilität* abhängt und indirekt von der Temperaturabweichung vom Soll innerhalb des Interferometers. Als Vorgabe gilt eine (Qu)BER = 0,01. Damit sind die minimal nutzbare Visibilität  $V$ , aber auch die maximal erlaubte Temperaturabweichung  $\Delta T$  und das thermische Stabilitätsfenster  $t_{\varphi;MAX}$  definiert, als Grundlage des Aufbaus folgend vorgestellter konstruktiver Elemente.

Fehlerverhältnis	$V_{min}$
BER $\approx 0,01$	0,467
QuBER $\approx 0,01$	0,490

Die notwendige Visibilität, wegweisend für den konstruktiven Aufbau der Interferometer der 2. Generation.

Aus schon beschriebener Nichtverfügbarkeit von robusten und langlebigen Einzelphotonenquellen wird im folgenden Verlauf eine stark gedämpfte cw- Laserquelle genutzt. Bei der Detektion mittels einer Fotodiode sind die Satelliten ständig als Untergrund messbar. Infolgedessen ist die ideal erreichbare Visibilität mit 0,500 berechenbar. Sobald die Quantenkryptografieeinheit mit einer *SPS* betrieben wird und die Auswertung des Quantenkanals über den Zentralpeak erfolgt, ist  $V$  mit 1,000 ideal definiert. Bei der Auswertung von Visibilität und (Qu)BER ist das zu beachten.

Die aus dem Bitfehler- Verhältnis „BER“ ermittelten Werte basieren auf der „Methode der Entscheidungsschwelle  $\varphi_E$ “.

Die aus dem Bitfehler- Verhältnis „QuBER“ ermittelten Werte basieren auf der „Methode der Wahrscheinlichkeiten“.

### 2.2.1 Die Thermobox

Die Thermobox stellt das Bindeglied zwischen Interferometer und Umwelt dar. Neben der Aufnahme von Anschlüssen, Anzeige- bzw. Einstelleinheiten ist die Hauptaufgabe der Thermobox die korrekte Konstanthaltung der Temperatur im Interferometergehäuse. Eine weitere Aufgabe erfüllt die am Boden mittels Federn und Dämpfungsgliedern befestigte Metallplatte. Sie verringert die Mikrofonie der Fasern im Inneren des Interferometers effektiv. Eine weitere Aufgabe ist die Aufnahme von Modulen der Spannungsaufbereitung. Im weiteren Verlauf sind hier nur die thermodynamischen Eigenschaften der Thermobox von Interesse.

Die Verlustleistung  $P$  bzw. der Wärmestrom  $\dot{Q}$  aus dem Inneren der Thermobox nach außen soll berechnet werden. Die Werte  $P$  oder  $\dot{Q}$  sind für die Berechnung weiterer physikalischer Größen notwendig.

Nr:	1	2	3	
Stoff:	Moosgummi	Selit	Moosgummi	
$d$	1	10	1	mm
$\lambda$	0,060	0,030	0,060	W/(mK)
$1/\Lambda = d/\lambda$	0,017	0,333	0,017	m <sup>2</sup> K/W

Thermische Stoffeigenschaften der Interferometerbox.

An den Übergängen Luft zu Moosgummi (Außen) und Moosgummi zu Luft (Innen) muss der Wärmeübergangswiderstand berücksichtigt werden. Damit können dann weitere thermische Größen errechnet werden, wie der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$ :

$$k = \frac{1}{1/\alpha_i + 1/\Lambda + 1/\alpha_a} \quad (18)$$

Der Wärmestrom  $\dot{Q}$ :

$$\dot{Q} = k (T_i - T_a) \quad (19)$$

Die thermische Verlustleistung  $P$ :

$$P = q \cdot A \quad (20)$$

Wobei  $A$  die Teiloberfläche der Thermobox, je nach betrachteter Wärmestromrichtung,  $T_i = 50^\circ\text{C}$  die Innen- und  $T_a = 20^\circ\text{C}$  die Umgebungstemperatur unter Normbedingungen ist.

Richtung:	Oben	Horizontal	Unten	
$1/\alpha_i$	0.10	0.13	0.17	m <sup>2</sup> K/W
$1/\alpha_a$	0.04	0.04	0.04	m <sup>2</sup> K/W

Wärmeübergangswiderstand für unbelüftete Grenzflächen nach DIN EN ISO 6946.

	Oben	Horizontal	Unten	
$A$	0,051	0,055	0,051	m <sup>2</sup>
$k$	1,97	1,86	1,73	W/(m <sup>2</sup> K)
$q$	59,2	55,9	52,00	W/m <sup>2</sup>
$P$	3,0	3,1	2,7	W

Wärmedynamische Werte der Thermobox 2. Generation.

Damit ist die nötige Heizleistung  $P$  berechnet, die der Thermobox zugeführt werden muss, damit diese im thermischen Gleichgewicht verbleibt, da ein Wärmestrom  $\dot{Q}$  nach außen Verluste induziert.

$$P = P_O + P_H + P_U = 3,0 + 3,1 + 2,7 = 8,8\text{W} \approx 9\text{W} \Rightarrow \dot{Q} = 9 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (21)$$

### 2.2.2 Das Interferometer

Das Interferometer als Hauptbestandteil der Time- Bin- Konfiguration befindet sich im Inneren der Thermobox und besteht aus mehreren Trägern und Module, wie:

#### • Mechanische Komponenten:

Das Gehäuse	<i>Ober-, Unterschale</i>
Die 2 Heizfolien	<i>Modul-, Gehäuseheizung</i>
Der Hauptträger	<i>mit Gehäuseverschluss</i>
Die 5 Modulträger	<i>Terminal, EOM, Faserpool, DAC, PES</i>
Der Faserpool	<i>Unterring, Mittelring, Oberplatte</i>
Der EOM- Halter	<i>optionale Delay- Line</i>
Die 2 Spiegelhalter	<i>Faraday- mirror</i>
Die 2 Platinenhalter	<i>PES, Faserpool</i>
Die 2 Faserfixatoren	<i>PES, Faserpool</i>
Die 2 Faserringhalter	<i>PES- Ring, Dummy- Ring</i>
Die 2 Temperatursensorhalter	<i>Unterschale, Faserpool</i>
Diverse Verbindungselemente	<i>Schrauben, Muttern, U- Scheiben, ...</i>

#### • Elektronische Komponenten:

Der Spannungssymmetrierer	<i>+18V → ±9V Out</i>
Die 2 Festspannungsmodule	<i>+12V, +5V Out</i>
Die Referenzspannungsquelle	<i>+2,500V Out</i>
Der 8- Bit DAC	<i>0 ... +5V Out</i>
Die Hochspannungsquelle	<i>max. +2000V Out</i>
Der Piezoring	<i>max. +1000V In</i>
Der DMS- Messwertabnehmer	<i>0 ... +2,5V Out</i>
Der Regler	<i>-2,5V ... +2,5V Regelumfang</i>
Die Reglerabschaltplatine	<i>+5V In → 0 ... +2,5V Out</i>
Die 2 Temperatursensoren	<i>Gehäuse, Module</i>

#### • Optische Komponenten

Der 50/50- Koppler	<i>in beiden Interferometern</i>
Der EOM	<i>in beiden Interferometern</i>
Die Delay- Line	<i>optional in einem Interferometer</i>
Die 2 Faraday- Spiegel	<i>in beiden Interferometern</i>
Der Faser- Piezo- Ring	<i>in einem Interferometer</i>
Der Faser- Dummy- Ring	<i>in beiden Interferometern</i>
Die 1550nm- Faser	<i>Single- Mode- Faser</i>

Eine wichtige physikalische Größe der Interferometerbox ist die *Thermische Trägheit*. Wichtig für den weiteren experimentellen Verlauf, soll diese berechnet werden. Dazu ist in folgender Tabelle der Füllungsgrad der Interferometer aufgelistet.

Die Berechnung des theoretischen Wertes für den Zeitraum der thermischen Stabilität der Interferometerboxen 2. Generation erfolgt nach dem Prinzip, wie bereits beschrieben wurde. Folgende Werte sind bekannt:

Volumen gesamt :	$V$	$0,00308\text{m}^3$
Anteil Kupferblech:	$N_{KU}$	$18\% \equiv 0,18$
Dichte Luft :	$\rho_{LU}$	$1204\text{kg}/\text{m}^3$
Dichte Kupfer:	$\rho_{KU}$	$8920\text{kg}/\text{m}^3$
Spezifische Wärmekapazität Luft :	$c_{LU}$	$1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$



Spezifische Wärmekapazität Kupfer:  $c_{KU}$  381J/(kg · K)

Wärmestrom nach außen:  $P, \dot{Q}$   $-9W \equiv -9J/s$

Damit ist der Temperaturgradient respektive die thermische Trägheit ermittelbar über:

$$\nabla T = \frac{\dot{Q}}{V \cdot (c_{KU} \cdot N_{KU} + c_{LU} \cdot (1 - N_{KU})) \cdot (\rho_{KU} \cdot N_{KU} + \rho_{LU} \cdot (1 - N_{KU}))}$$

$$\Rightarrow \nabla T = -1,3mK/s \quad (22)$$

Nun kann die maximal, zeitliche Stabilität berechnet werden:

$$t_{\varphi;MAX} = \frac{\Delta T_{\varphi;MAX}}{|\nabla T|} \approx 79s \quad (23)$$

Dieser Wert soll experimentell nachgewiesen werden.

Modul:	Gewicht Real kg	Gewicht Anteil %
Gehäuse	1,25	7,27
Hauptträger	1,95	11,34
PES	0,62	3,60
Faserpool	1,54	8,95
EOM	0,38	2,21
Terminal	0,54	3,14
DAC	0,31	1,80
Gesamt I:	6,6	38,4
<i>Verbund</i>	–	≈ –10,0
<i>Einbauten</i>	–	≈ –10,0
Gesamt II:	9,5	≈ 18

Der **Füllungsgrad** der Interferometerbox 2. Generation. Theoretisches Maximalgewicht 17,2kg  $\equiv$  100%.

(\*) = Verbund, der Anteil nichtmetallischer Verbindungselemente,

(\*\*) = Einbauten, der Anteil anderer nichtmetallischer, eingebauter Komponenten.

### 2.2.3 Der Fasereinbau

Der Fasereinbau in die Interferometerboxen muss bestimmten Ansprüchen genügen. Neben rein physikalischen gibt es auch technologische Punkte, welche zu beachten sind. Zusammenfassen kann man die Anforderungen an den Fasereinbau in:

- **physikalisch:**

minimal mögliche Verlegungsradien der Faser

Verringerung der Fasermikrofonie

Verhinderung von Faserspannungen

...

- **technologisch:**

Aufnahmemöglichkeit langer Fasern

Möglichkeiten des (nachträglichen) Spleißens

Vorbereitung eines zusätzlichen Einbaus optionaler Komponenten

...

Zur Ermittlung der minimal möglichen Radien der genutzten Faser im Hinblick auf Dämpfung und thermische Spannungen wurde ein Versuch durchgeführt, mit dem Ergebnis von  $d_{min, PES} = 70\text{mm}$  für den Piezoelektrischen Stabilisator und die Faserverlegung.

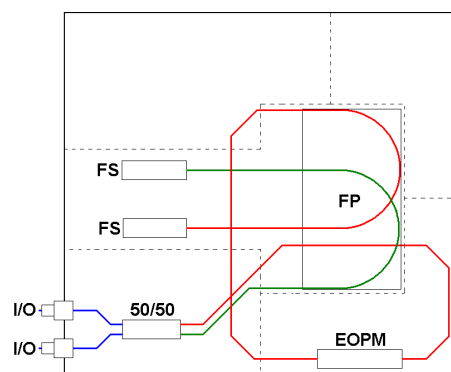
Zum Zwecke der Verringerung der *Fasermikrofonie* werden speziell entwickelte *Faserfixatoren*, sowie der Faserpool, welcher die Fasern festhält, so dieser freiliegende Faserlängen minimiert.

Nutzt man kommerziell gefertigte optische Komponenten (z. B. der 50/50- Koppler), besitzen diese lange Anschlüsse, welche man nicht unbedingt kürzen möchte, diese nimmt dann der Faserpool ebenfalls auf.

Beim Einbau von optionalen optischen Elementen muss man spleißen. Die Gerätschaft die dann gebraucht wird, ist im Allgemeinen größer, als dass sie direkt in der Interferometerbox 2. Generation genutzt werden könnte. Auch daher braucht man größere Anschlusslängen um außerhalb der Box spleißen zu können. Diese Längen nimmt danach auch der Faserpool auf.

Will man oben genannte Anforderungen komplex erfüllen, ist es sinnvoll einen Faserdesignplan zu erstellen. Für vorliegenden Fall muss es zwei verschiedene geben, einen Plan mit Piezoelektrischen Stabilisator und einen ohne diesen.

Der Faserdesignplan für das Interferometer 2. Generation ohne den Piezoelektrischen Stabilisator, jedoch vorbereitet für einen nachträglichen Einbau bei Bedarf. Folgend dann das Abbild eines Faserdesignplans mit Piezoelektrischen Stabilisator.



Das Faserdesign innerhalb der Interferometerbox 2. Generation ohne Piezoelektrischen Stabilisator mit folgenden optischen Elementen:

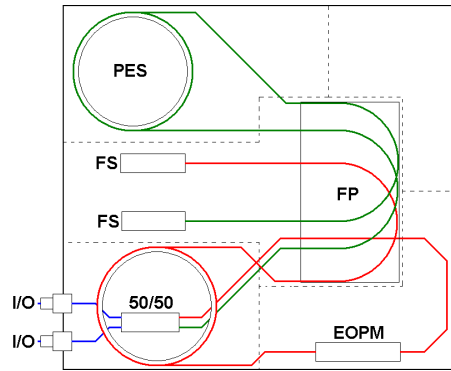
**FP** = Faserpool, **FS** = Faraday- Spiegel,

**EO(P)M** = Elektrooptischer (Phasen)Modulator,

**I/O** = Faseranschlüsse, **50/50** = 50/50- Koppler,

gestrichelt angedeutet sind die Träger und Module der notwendigen elektrischen und elektronischen Platinen.

In keinem der obigen Abbilder sind optionale optische Komponenten eingezeichnet, wie z. B. eine *Delay- line*, welche Fertigungstoleranzen bei der Faserablängung der Interferometerarme ausgleichen soll.



Das Faserdesign innerhalb der Interferometerbox 2. Generation mit Piezoelektrischen Stabilisator mit folgenden optischen Elementen:

**FP** = Faserpool, **FS** = Faraday- Spiegel,

**EO(P)M** = Elektrooptischer (Phasen)Modulator,

**I/O** = Faseranschlüsse, **50/50** = 50/50- Koppler,

**PES** = Piezoelektrischer Stabilisator im anderen Arm der Dummyring zum Ausgleich der Faserverlängerung, gestrichelt angedeutet sind die Träger und Module der notwendigen elektrischen und elektronischen Platinen.

### 2.2.4 Der Piezoelektrische Stabilisator

Piezoelectric  
stabilizer

Die Entwicklung des Piezoelektrischen Stabilisators stellt eine besondere Herausforderung in der Herstellung der Interferometer 2. Generation dar. Der PES soll letztendlich es erst überhaupt ermöglichen, Informationen über die Time- Bin- Konfiguration zu übertragen. Ziel ist das Konstanthalten der optischen Ausgangsleistung der Interferometer, um diese dann definiert über den Elektrooptischen (Phasen)Modulator - EO(P)M auszusteuern. Der PES ist technologisch in drei Module unter-scheidbar, der mit einer Faser bewickelte **Piezoring**, der ansteuernde **DAC** mit dem Hochspannungs-netzteil und der **Regelkreis**.

Fiber wound  
piezo ring

**Der faserbewickelte Piezoring:** Die Nutzung eines faserbewickelten Piezorings bewirkt eine Pha-senverschiebung  $\Delta\varphi$  in der Frequenz- oder in der Zeitdomäne ein  $\Delta t$  infolge Faserlänge in einem Arm des Interferometers. Das Funktionieren des faserbewickelten Piezorings ist an einigen Rand-bedingungen gebunden, das technologische Vorangehen bei der Darstellung mit einigen Vorbetrach-tungen und verschiedenen Methoden verbunden, wie z. B. das genaue Abmessen zweier Fasern von (hier) 16m Länge oder das Aufbringen dieser bei +1000V am Piezoring anliegender Spannung. Aus allen diesen Überlegungen folgte dann der durchgeführte Aufbau des piezoelektronischen Stabilisa-tors.

- Genutzt wird der Standardpiezoring 74x20x4 mit einem spannungsabhängigen Hub des Durch-messers von  $\Delta d_{\max} = 5\mu\text{m}$  bei  $U_{\max} = 1000\text{V}$ . Bestückt mit  $N = 64$  Windungen einer Monomo-defaser  $d_{\text{Faser}} = 125\mu\text{m}$  lässt sich selbst bei Einsatz eines Mounting- Ringes die Lagenanzahl  $n = 1$  erzielen. Dadurch ist ein Einfluss der Querkontraktion -  $Q$  auf die Wirksamkeit der Faserdehnung nicht zu erwarten. Ebenso besteht keine Gefahr des Faserbruchs. Die mindestens benötigte Länge der Monomodefaser beträgt  $L \approx 15\text{m}$ . Die erreichbare Faserdehnung lässt sich mit den gewünschten  $\Delta L = 1\text{mm}$  angeben, das entspricht einer Phasenverschiebung von  $645 \times 2\pi$  bei 1550nm oder einer zeitlichen Verzögerung des Signals von  $\Delta t = 4,8\text{ps}$  bei einer angenommenen Brechzahl von 1,444 im Faserkern bei 1550nm.

- Beim Bewickeln des Piezorings ist zu beachten, dass der Ring beim Anlegen der Spannung kontrahiert, bedeutet, dass sich der Durchmesser verkleinert. Für das erwartungsgemäße Funktionieren des Piezoelektronischen Stabilisators ist deshalb das Aufbringen der Windungen unter einer Vor-spannung unterhalb der Faserbruchdehnung erforderlich. Aus technologischen Gründen wird die Vorspannung der Faser nicht in jeder Windung gleich sein. Deshalb ist vor dem Einsatz im vorgese-henen Interferometer eine künstliche Alterung durchzuführen. Dabei werden die unterschiedlichen Vorspannungen in den Windungen durch *Schlupf* ausgeglichen, was sich als Sprünge in den Cha-rakteristika des Piezorings ausmachen lässt. Nach mehreren Durchläufen über den gesamten Span-nungshub des Piezos treten diese Sprünge nicht mehr auf. Die Möglichkeit des Aufwickelns bei angelegten 1000V dann ohne Faservorspannung kann ebenso in Erwägung gezogen werden.

Bezeichner	Charakteristika	Einheit
Piezoring	PiT74	-
Außendurchmesser	74	mm
Ringhöhe	20	mm
Wandstärke	4	mm
Mounting Socket	nicht vorhanden	-
Ansteuerspannung max.	-300...+2000	V
Elektrische Kapazität	20	nF
Radiale Kontraktion max.	5	$\mu\text{m}$
Axiale Kontraktion max.	2	$\mu\text{m}$
Radiale Resonanz typ.	13	kHz
Axiale Resonanz typ.	80	kHz
Innere Elektrode	Ag	-
Äußere Elektrode	Ag	-

Allgemeine Charakteristika laut Datenblatt. Garantierte Kontraktionswerte gelten für eine Ansteuerung von 0 auf +1000V unter den vom Hersteller angegebenen Aktivierungshinweise.

- Eine genauere Betrachtung sollte den Faseranschlüssen am Piezoring gehören. Insbesondere die technologische Lösung des Übergangs loser Faseranschluss zu vorgespannter Faserwicklung auf dem Ring.
- Für die Effekte frequenzbedingte Resonanz, thermische Drift, Parameter- Offset infolge Alterung, u. a. müssen praktische Untersuchungen durchgeführt werden. Dies erfordert im Vorhinein den Aufbau eines geschlossenen Regelkreislaufs zur Überwachung und Einhaltung der geforderten Werte von  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta t$  oder  $\Delta L$ .
- Für die genaue Dimensionierung des Netzteils und dessen technologische Gestaltung muss eine Untersuchung durchgeführt werden.

Bezeichner	Parameter	Einheit
Windungszahl	$N_0 = 64$	–
Lagenanzahl	$n = 1$	–
Faserlänge	$L_0 \approx 15$	m
Längenänderung max.	$\Delta L_{Max} = 1$	mm
Phasenverschiebung max.	$\Delta\varphi_{Max} = 645$	$2\pi$
Zeitverzögerung max.	$\Delta t_{Max} = 4,8$	ps
Spannungsgesteuertes $\Delta L$	$\Delta L_{Max}/U_{Max} = 1$	$\mu\text{m/V}$
Spannungsgesteuertes $\Delta\varphi$	$\Delta\varphi_{Max}/U_{Max} = 0,645$	$2\pi/\text{V}$
Spannungsgesteuertes $\Delta t$	$\Delta t_{Max}/U_{Max} = 4,8$	fs/V

Theoretische elektrooptische Parameter.

Alle Parameter bei einer Ansteuerung von  $U_{Max} = +1000\text{V}$  für eine Monomodefaser bei 1550nm

$\Delta\varphi/U$  kann die Wirkung des PES für die Frequenzdomäne berechnet werden:

$$\frac{\Delta\varphi_{Max}}{U_{Max}} = 0,645 \left[ \frac{2\pi}{\text{V}} \right]$$

Pro Windung ist für eine Phasenverschiebung von  $2\pi$  eine Spannung  $U$  nötig mit:

$$U_\varphi = \frac{U_{Max}}{\Delta\varphi_{Max}} \cdot N_0 \approx 100 [\text{V}] \quad (24)$$

Analog gilt für die Zeitdomäne  $\Delta t$ :

$$\frac{\Delta t_{Max}}{U_{Max}} = 4,8 \left[ \frac{\text{fs}}{\text{V}} \right]$$

Pro Windung ist für eine Zeitverzögerung von 1 [fs] eine Spannung  $U$  nötig mit:

$$U_t = \frac{U_{Max}}{\Delta t_{Max}} \cdot N_0 \approx 15 [\text{V}] \quad (25)$$

**Der DAC und das Hochspannungsnetzteil:** Der DAC und das Hochspannungsnetzteil ist das Bindeglied zwischen Regler und dem faserbewickelten Piezoring. An diesem Modul müssen verschiedene und entscheidende Anforderungen gestellt werden, um ein nutzbares Ergebnis in der Regelbarkeit der optischen Ausgangsleistung zu erzielen. Die technologische Umsetzung dieser Anforderungen erfolgt durch eine externe Bearbeitung. Daher wird, um den Regelkreis überhaupt testen zu können, ein kommerziell angebotener 8- Bit- DAC, sowie ein spannungsgesteuertes Mini- Hochspannungsnetzteil als Zubehör originär für eine Fozelle genutzt.

Digital to analog converter

High voltage power supply

**Auflösungsgrenze, Piezo als fein einstellendes Element:** Elektronik mit einer ordentlichen *Reproduzierbarkeit* kleiner bis kleinster Spannungsgrößen ist schwer zu realisieren (Aufwand in Zeit und Technologie). Störungen von außen eingebracht, Rauschen verschiedenster Quellen, usw. erhöhen die Nachweisgrenze der Nutzspannung auf endliche Größen. So ist in der Praxis bekannt, dass an der vierten, spätestens fünften Nachkommastelle für Spannungsgrößen Schluss mit der Reproduzierbarkeit ist (entspricht  $U_{Min}$ ). Dies begrenzt die nötige Auflösung in *Bit* des DA- Wandlers. In

Reproducibility

eine Tabelle eingetragen, lässt sich die maximale Bittigkeit abschätzen.

$$\frac{U_{Max}}{\Delta\varphi_{Max}} \cdot \frac{1}{2^{Bit}} = \frac{0,775}{2^{Bit}} \leq U_{Min}^{(Fein)} \left[ \frac{V}{\pi \cdot Bit} \right] \quad (26)$$

Bit	$U_{Min}^{(Fein)}$	Reproduzierbarkeit
1	0,387 50	auflösbar
2	0,193 75	auflösbar
3	0,096 88	auflösbar
4	0,048 44	auflösbar
5	0,024 22	auflösbar
6	0,012 11	auflösbar
7	0,006 06	auflösbar
8	0,003 03	auflösbar
9	0,001 52	möglich
10	0,000 76	möglich
11	0,000 38	möglich
12	0,000 19	möglich
13	0,000 09	sehr aufwändig

Reproduzierbarkeit des DAC unter gegebenen Bedingungen als feinauflösendes Element.  
Ab dem 13. Bit ist keine Reproduzierbarkeit unter normalen Kosten zu Nutzen mehr gegeben.

**Auflösungsgrenze, Piezo als grob einstellendes Element:** Soll der DA- Wandler als grob einstellendes Element wirken, wird  $\Delta\varphi = 645 [2\pi]$  gesetzt (maximale Nutzungsbreite des PES), somit ergibt sich:

$$U_{Max} \cdot \frac{1}{2^{Bit}} = \frac{1000}{2^{Bit}} \leq U_{Min}^{(Grob)} \left[ \frac{V}{Bit} \right] \quad (27)$$

Bit	$U_{Min}^{(Grob)}$	$\frac{\Delta\varphi_{Max}}{U_{Max}} \cdot U_{Min}^{(Grob)} \left[ \frac{2\pi}{Bit} \right]$	Reproduzierbarkeit
1	500,000	322,500	grob
2	250,000	161,250	grob
3	125,000	80,625	grob
4	62,500	40,313	grob
5	31,250	20,156	grob
6	15,625	10,078	grob
7	7,813	5,040	grob
8	3,906	2,519	grob
9	1,953	1,260	grob
10	0,977	0,630	fein
11	0,488	0,315	fein

Reproduzierbarkeit des DAC unter gegebenen Bedingungen als grobauflösendes Element. Ab dem 10. Bit arbeitet der DAC wie ein feinauflösendes Element. Ab dem 13. Bit ist eine Auflösung noch möglich. Darunter nur noch mit hohem Aufwand.

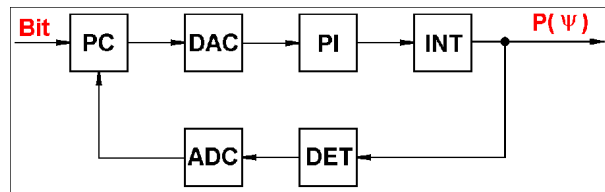
$$\frac{\Delta\varphi_{Max}}{U_{Max}} \cdot U_{Min}^{(Grob)}$$

bezeichnet die Anzahl der übersprungenen Perioden  $2\pi$  mit jeder De- oder Inkrementierung des Wertes  $Bit$  von 1.

**(Umsetz)Geschwindigkeit, Schnelligkeit:** Wichtig für die Stabilisierungsanwendung ist die Umsetzgeschwindigkeit des am DA- Wandler erscheinenden Bit- Signals zur analogen Ausgangsspannung. Bestimmend für diese Anforderung ist neben anderen physikalisch, technologischen Gründen der Regelkreis des gesamten Piezoelektrischen Stabilisators.

**Regelkreis:** Für die Austestung der optischen Stabilität wird eine konstante optische Leistung der Interferometer in Time- Bin- Konfiguration benötigt. Dies ist nur über die Realisierung durch einen äußeren Regelkreis möglich. Dieser Regelkreis beinhaltet folgende Glieder laut folgender Abbildung.

Feedback control systems



Der Regelkreis für die Interferometer. **PC** = ein als Regler agierende Computer, **DAC** = Digital- Analog- Wandler, **PI** = der faserbewickelte Piezoring, **INT** = das Interferometer, **DET** = der Detektor, **ADC** = Analog- Digital- Wandler, **Bit** = Sollwert- Vorgabe als 8- Bit- Eingabe, **P(ψ)**= optische Ausgangsleistung.

Weiterhin sind die Übertragungsfunktionen der Glieder definierbar:

<b>DAC</b>	
Eingangssignal	$0 \leq Bit \leq 255$
Ausgangssignal	$0V \leq U_{DAC} \leq 2,5V$
Übertragung	Linear: $U_{DAC} \propto Bit$
<b>PI</b>	
Eingangssignal	$0V \leq U_{DAC} \leq 2,5V$
Ausgangssignal	$0mm \leq \Delta L \leq \Delta L_{Max}$
Übertragung	Linear: $\Delta L \propto U_{DAC}$
<b>INT</b>	
Eingangssignal	$0mm \leq \Delta L \leq \Delta L_{Max}$
Ausgangssignal	$2 \leq P(\psi) \leq 6$
Übertragung	Nichtlinear: $P(\psi) \propto 2 + 4 \cdot \cos^2(\Delta L)$
<b>DET</b>	
Eingangssignal	$2 \leq P(\psi) \leq 6$
Ausgangssignal	$0 \leq U_{Ref} \leq 6$
Übertragung	Quasilinear: $U_{Ref} \propto P(\psi)$
<b>ADC</b>	
Eingangssignal	$U_{Ref} \propto P(\psi)$
Ausgangssignal	$0 \leq Bit \leq 255$
Übertragung	Linear: $Bit \propto U_{Ref}$

Mit der Auflistung der einzelnen Eigenschaften der Übertragungsglieder lassen sich die Übertragungsfunktionen des Hin- und Rückweges (Regelstrecke und Rückkopplung) entwickeln.

**Regelstrecke- DAC → PI → INT** (nur rechtsseitige Terme ändern sich):

$$P(\psi) \propto 2 + 4 \cdot \cos^2(\Delta L) \tag{28}$$

⇒

$$P(\psi) \propto 2 + 4 \cdot \cos^2(U_{DAC}) \tag{29}$$

⇒

$$P(\psi) \propto 2 + 4 \cdot \cos^2(Bit) \tag{30}$$

Um den folgenden Randbedingungen zu genügen, wird die Proportionalgleichung linear angepasst:

$$Bit = 0 \rightarrow P(\psi) = 2$$

$$Bit = 255 \rightarrow P(\psi) = 6$$

⇒

$$P(\psi) = 2 + 4 \cos^2 \left( \left[ 1 - \frac{Bit}{255} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \right) \tag{31}$$

**Rückkopplung- DET → ADC** (nur linksseitige Terme ändern sich):

$$U_{Ref} \propto P(\psi) \tag{32}$$

⇒

$$Bit \propto P(\psi) \tag{33}$$

Um den folgenden Randbedingungen zu genügen, wird die Proportionalgleichung linear angepasst:

$$P(\psi) = 2 \Rightarrow Bit = 0$$

$$P(\psi) = 6 \Rightarrow Bit = 255$$

⇒

$$Bit = 63,75 \cdot P(\psi) - 127,5 \tag{34}$$

Laplace-  
transformation

Beide Übertragungsfunktionen sind zeitinvariant. Daher ist die Umrechnung in die Bilddomäne mittels *Laplace-Transformation* vereinfacht. Allgemein gilt:

$$G(s) = K \cdot \int_0^\infty g(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt$$

Da  $g(t) = 1$  gegeben ist, somit eine Zeitinvarianz vorliegt, wird die Laplace-Transformation durchgeführt über:

$$G(s) = K \cdot \int_0^\infty e^{-s \cdot t} dt = \frac{K}{s}$$

Für vorliegenden Regelkreis bedeutet das für die Regelstrecke  $G_O(s)$ :

$$G_O(s) = K_1 \cdot \frac{1}{s} \tag{35}$$

Mit:

$$K_1 = 2 + 4 \cos^2 \left( \left[ 1 - \frac{Bit}{255} \right] \cdot \frac{\pi}{2} \right) = P(\psi) \tag{36}$$

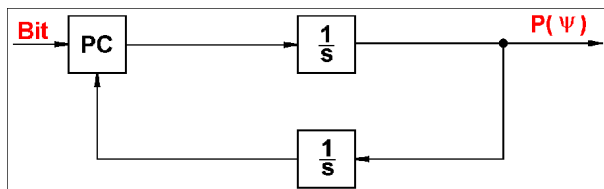
Für vorliegenden Regelkreis bedeutet das für die Rückkopplung  $G_U(s)$ :

$$G_U(s) = K_2 \cdot \frac{1}{s} \tag{37}$$

Mit:

$$K_2 = 63,75 \cdot P(\psi) - 127,5 = Bit \tag{38}$$

Damit ändert sich der Aufbau des Regelkreises wie im folgenden Abbild dargestellt.



Der Regelkreis für die Interferometer in der Bilddomäne.

Um die notwendigen Eigenschaften des Regelgliedes analysieren zu können, ist es nötig, den Regelkreis weiter zu vereinfachen. Regelstrecke und Rückkopplung werden zusammengefasst unter der ersten Annahme, dass PC einen variabel programmierbaren Knotenpunkt darstellt (Im späteren praktischen Verlauf auch so realisiert).



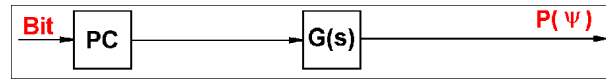
Aus der Regelungstechnik ist eine Berechnungsgrundlage bekannt, mit welcher das obere  $G_O$  und das untere  $G_U$  1/s- Glied zu einem  $G(s)$  vereint werden kann:

$$G(s) = \frac{G_O}{1 + G_O \cdot G_U} \quad (39)$$

⇒

$$G(s) = \frac{K_1 \cdot s}{s^2 + K_1 \cdot K_2} \quad (40)$$

Der Regelkreis hat sich weiter vereinfacht und



Der Regelkreis für die Interferometer in der Bilddomäne zusammen gefasst.

ist damit analytisch beschreibbar.

Die Übertragungsfunktion  $G(s)$  stellt vorerst einen praktisch nicht zu realisierenden Regler dar. Die Aufgabe von PC ist es, ein Regelglied zu generieren, damit der Regler soft- und hardwaremäßig aufbaubar ist. Aus letztem Abbild ist erkennbar, dass gilt:

$$P(\psi) = G(s) \cdot G_{PC}(s) \cdot Bit \quad (41)$$

⇒

$$P(\psi) = \frac{P(\psi)}{s^2 + P(\psi) \cdot Bit} \cdot Bit \quad (42)$$

Mit:

$$G_{PC}(s) = \frac{1}{s}$$

Die Übertragungsfunktion  $G_{PC}(s)$  des benutzten Regelcomputers wurde so gewählt, dass der Regler nun ein praktisch realisierbares Element darstellt.  $G_{PC}(s)$  muss ein integratives Verhalten aufweisen (1/s- oder auch I- Glied genannt) und  $G(s)$  nun modifiziert zu  $G^*(s)$  stellt ein PT2- Glied dar.

$$P(\psi) = G^*(s) \cdot Bit \quad (43)$$

⇒

$$G^*(s) = \frac{P(\psi)}{s^2 + P(\psi) \cdot Bit} \quad (44)$$

Die allgemeine Darstellung eines PT2- Gliedes lautet:

$$G_{PT2}(s) = \frac{1}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D \cdot T \cdot s + 1}$$

Dabei ist  $T > 0$  die Zeitkonstante des PT2- Gliedes und  $D$  die Dämpfung innerhalb des Regelgliedes. Diese ist hier gleich Null, also theoretisch ungedämpft. In der Praxis treten jedoch immer Dämpfungen auf, diese wurden hier jedoch nicht betrachtet.

Weiterhin ist erkennbar, dass gelten muss:

$$P(\psi) \cdot Bit \propto 1$$

⇒

$$P(\psi) \propto \frac{1}{Bit} \quad (45)$$

In Worten bedeutet dies, ändert sich der Wert von  $P(\psi)$  vom Sollwert z. B. 4 (entspricht  $Bit = 128$ ) in Richtung des Wertes 6 (entspricht  $Bit = 255$ ), so muss der PC so programmiert sein, dass der ausgegebene korrigierende Bitwert *dekrementiert* ist, bedeutet kleinere Bitwerte werden ausgegeben ( $Bit < 128$ ).

Diese Forderung wurde mit den oben angegebenen Randbedingungen erfüllt. Die Programmierung des PCs folgte diesen Erfordernissen.



## 3 Experimententeil

### 3.1 Analyse der Interferometer 1. Generation

Zu Beginn des hier vorgestellten Themas „Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie“ existierten in der Arbeitsgruppe *NANO* der Humboldt- Universität zu Berlin zwei Prototypen von Interferometern, die zum Zwecke der Erprobung bereits vorhandener elektronischer und hard- oder softwareseitig realisierter Systeme aufgebaut wurden. Die Interferometer bestanden aus dünnen Kupferblech mit Fasereinbau, jedoch ohne jegliche Phasenmanipulation und -stabilisierung. Diese Interferometer waren in entsprechend größeren *Thermoboxen* untergebracht mit einer externen Regeleinheit für die Temperatureinstellung und -konstanthaltung.

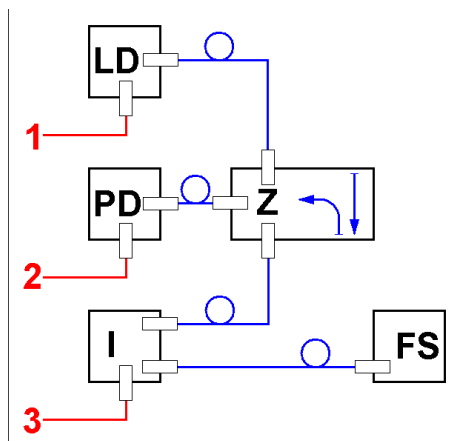
Im Rahmen mehrerer Versuche wurden die Visibilität und die thermische Trägheit untersucht und charakterisiert. Aus diesen gewonnenen Werten und den Vorgaben für die Nachfolgerinterferometer wurden wichtige Informationen für den konstruktiven Aufbau gewonnen.

Visibility

### 3.1.1 Die Visibilität

Basierend auf den Messreihen kann die Visibilität der vorhandenen Interferometer im Alleinbetrieb und in der Time- Bin- Konfiguration ermittelt werden. Die Messzeit betrug jeweils 500s.

**Interferometer im Alleinbetrieb:** Für die Visibilitätsmessung der zwei vorhandenen Interferometer der 1. Generation wurde ein spezieller Aufbau implementiert. Am Ausgang des auszumessenden Interferometers wurde ein Faraday- Spiegel angeschlossen, der ein zweites angehängenes Interferometer



Der Aufbau für den **Versuch**. **Rot** bezeichnen elektrische und **blau** optische Verbindungen. 1 = Leistungstreiber für die Laserdiode, 2 = Anschluss der Fotodiode an das Speicher- Oszilloskop, 3 = Anschluss an die Temperaturstabilisierung. **LD** = Laserdiode, **PD** = Photodiode, **Z** = Zirkulator, **I** = Interferometer, **FS** = Faraday- Spiegel

emuliert mit den exakt gleichen Eigenschaften des Messobjekts. Der Zirkulator am Eingang trennt lediglich die eingestrahelte von der auszumessenden optische Leistung am Interferometer.

Folgende 5 Messwerte wurden für je Interferometer 1 und 2 ermittelt.

Interferometer	MAX	MIN	V	$P(\psi_m)$
1	2,160	1,480	0,187	0,920
1	2,160	1,520	0,174	0,843
1	2,200	1,480	0,196	0,975
1	2,160	1,500	0,180	0,878
1	2,160	1,480	0,187	0,920
∅ von 1	2,168	1,492	<b>0,185</b>	0,908
2	2,140	0,720	0,497	3,952
2	2,160	0,720	0,500	4,000
2	2,120	0,740	0,483	3,737
2	2,160	0,700	0,510	4,163
2	2,180	0,720	0,503	4,048
∅ von 2	2,152	0,720	<b>0,499</b>	3,984

Die ermittelten MAX- und MIN- Werte und die daraus berechneten Visibilitäten und deren **Mittelwerte**.

Eine erste Auswertung der gemittelten Visibilitäten lässt vermuten, dass das Interferometer 1 nicht ausreichend für eine aufzubauende Time- Bin- Quantenkryptografieeinheit arbeitet. Der Unterschied zum optimal funktionierenden Interferometer 2 sind die *MIN*- Werte, welche in etwa doppelt so hoch liegen wie die von Interferometer 2. Eine Möglichkeit der Fehlerkorrektur ist die Nutzung des *Time- Bin- Kriterium*, welches eine Entscheidung ermöglicht, ob ein Interferometer in Time- Bin- Konfiguration arbeitet oder nicht.

Time- bin- criterion

Die fehlerkorrigierten Visibilitäten  $\tilde{V}$  ergeben dann folgendes Wertebild.

Interferometer	V	TBK	$\tilde{V}$	$P(\psi_m)$
1	0,187	2,040	0,381	0,920
1	0,174	2,111	0,376	0,843
1	0,196	2,018	0,396	0,975
1	0,180	2,083	0,375	0,878
1	0,187	2,056	0,384	0,920
⊙ von 1	0,185	2,065	0,382	0,908
2	0,497	1,009	0,501	3,952
2	0,500	1,000	0,500	4,000
2	0,483	1,047	0,506	3,737
2	0,510	0,972	0,496	4,163
2	0,503	0,991	0,498	4,048
⊙ von 2	0,499	1,004	0,500	3,984

Die fehlerkorrigierten Visibilitäten und die daraus berechneten **Mittelwerte**.

Die Endauswertung lässt den Schluss zu, dass das Interferometer 2 optimal für eine Time- Bin-Quantenkryptografieeinheit arbeitet, das Interferometer 1 jedoch unter seinen Erwartungen bleibt und dessen *TBK* aussagt, dass es nicht für eine Anwendung geeignet ist.

Letztere Tabelle soll grafisch dargestellt werden, wobei der Wert  $P(\psi_m)$  als *Abszisse* dient. Für den Wert *MAX* gilt:

$$MAX = 1 + P(\psi_m) + 1 = 2 + P(\psi_m) \quad (46)$$

Sowie für *MIN*:

$$MIN = 1 + 0 + 1 = 2$$

⇒

$$MAX - MIN = P(\psi_m) \quad (47)$$

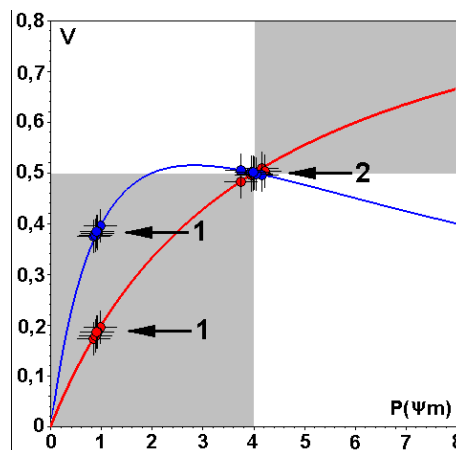
Damit ergibt sich für *V*

$$V = \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} = \frac{P(\psi_m)}{P(\psi_m) + 4} \quad (48)$$

und  $\tilde{V}$ , die fehlerkorrigierte Visibilität:

$$\tilde{V} = TBK \cdot V = 6 \cdot \frac{P(\psi_m)}{(P(\psi_m) + 2) \cdot (P(\psi_m) + 4)} \quad (49)$$

Der folgende Graf veranschaulicht die Arbeitsweise der Interferometer 1 und 2.



Die gemessenen **Visibilitäten**  $V$  im Vergleich zu den **fehlerkorrigierten Werten**  $\tilde{V}$ . Es wird verdeutlicht, beim Interferometer 2, welches in Time- Bin- Konfiguration arbeitet, liegen die Werte von  $V$  und  $\tilde{V}$  in einem gemeinsamen Bereich, als Zeichen für ein  $TBK = 1$ .

**Interferometer in Time- Bin- Konfiguration:** Nachdem die Interferometer einzeln charakterisiert wurden, sind Messungen beider Interferometer in Time- Bin- Konfiguration durchgeführt worden. Auch hier wird die oben beschriebene Fehlerkorrektur mittels Time- Bin- Kriterium anschließend angewandt.

Messung	MAX	MIN	V	T[°C]
1	2,652	2,378	0,054	21,16
2	2,896	2,182	0,141	24,11
3	3,079	2,269	0,151	27,89
4	2,757	2,241	0,103	30,45
5	3,131	2,277	0,158	32,22
6	3,033	2,155	0,169	34,52
7	3,221	1,955	0,245	36,62
8	3,089	1,843	0,253	38,41
9	3,499	1,789	0,323	39,81
10	3,160	2,032	0,217	41,10

Die ermittelten MAX- und MIN- Werte und die daraus berechneten Visibilitäten und dessen **Maximalwert**. Zusätzlich wurde die Temperatur der Interferometer aufgenommen während ihrer Aufheizung.

Die fehlerkorrigierten Visibilitäten  $\tilde{V}$  können nun berechnet werden.

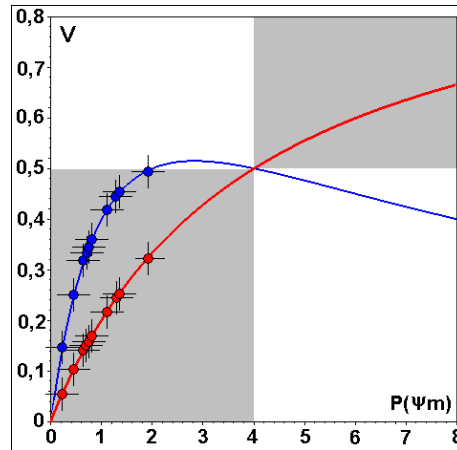
Messung	V	TBK	$\tilde{V}$	$P(\psi_m)$
1	0,054	2,690	0,145	0,230
2	0,141	2,260	0,319	0,650
3	0,151	2,210	0,334	0,715
4	0,103	2,439	0,251	0,460
5	0,158	2,182	0,345	0,750
6	0,169	2,132	0,360	0,814
7	0,245	1,821	0,446	1,295
8	0,253	1,790	0,454	1,352
9	0,323	1,534	0,495	1,911
10	0,217	1,929	0,419	1,110

Die berechneten fehlerkorrigierten Visibilitäten und dessen **Maximalwert**.

Die fehlerkorrigierte Visibilität  $\tilde{V}$  zeigt einen nutzbaren Wert für die Anwendung der Interferometer 1. Generation in einem Quantenkryptografieexperiment. Dennoch verdeutlicht der dazu gehörige minimale TBK- Wert mit 1,534, dass die Interferometer nicht exakt in Time- Bin- Konfiguration arbeiten. Die Gründe für diese Güte sind in der ungünstigen optischen Stabilität zu suchen, welche im Abschnitt 3.1.3 näher beschrieben wird. Vermuteter Hauptgrund ist die Herstellungstechnologie der *gezogenen Fasern*, um eine notwendig exakt definierte Faserarmlänge der beiden Interferometer technologisch zu erreichen. Für den Bau der Interferometer der 2. Generation wird deshalb ein anderes Herangehen in Bezug Faserarmlänge präferiert.

Die gemessene Visibilität  $V$  zeigt eine starke Abhängigkeit von der Temperatur im Inneren der Interferometer. Die fehlerkorrigierte Visibilität  $\tilde{V}$  verdeutlicht diese nur in den unteren Bereichen bis etwa 30°C. Danach ist die Temperaturabhängigkeit gering(er). Die gewählten Temperaturen im Inneren der Interferometer zwischen 40 bis maximal 50°C sind ursprünglich der Notwendigkeit geschuldet, einen definierten Temperaturgradienten zur Umwelt zu erhalten. Dennoch wurde auf Grund dieser Ergebnisse entschieden, dass die Temperatur der Interferometer der zukünftigen 2. Generation um die 40°C gewählt wird.

Zum Abschluss dieses Abschnittes soll die Abhängigkeit der Visibilitäten  $V$  und  $\tilde{V}$  von  $P(\psi_m)$  grafisch verdeutlicht werden.



Die **gemessene**  $V$  und die **fehlerkorrigierte**  $\tilde{V}$  grafisch dargestellt.

Eine gute Übereinstimmung zwischen den Theorie- und Experimentalwerten ist gegeben.

## 3.1.2 Die thermische Trägheit

Thermal inertia

**Versuchswert:** Basierend auf den Messreihen der *Versuche* kann die thermische Trägheit der vorhandenen Interferometer ermittelt werden. Die Messzeit betrug jeweils 500s, der Messwert wurde am Anfang und am Ende abgenommen, der Gang dazwischen ist nicht beachtet worden. Vorhanden waren zwei Boxen mit identisch thermischen Eigenschaften. Betrachtet wird folgend nur die Abkühlung, da die technischen Daten des Temperaturregelkreises für eine Erwärmung nicht ausreichend waren, um diese Messwerte auch nutzen zu können.

t[s]	Box 1		Box 2	
	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
0	39,58	35,40	48,26	48,79
500	38,28	34,43	46,55	46,99
$\Delta T$ [K]	-1,30	-0,97	-1,71	-1,80
$\ominus \Delta T$ [K]	-1,45			

Temperaturmesswerte der freien Abkühlung der vorhandenen Interferometer und der sich daraus ergebene **Mittelwert** der Temperaturdifferenz.

Der Temperaturgradient  $\nabla T$  beträgt damit:

$$\nabla T = \frac{\Delta T}{500} = -2,9 \text{mK/s} \quad (50)$$

Da die maximal erlaubte Temperaturabweichung in etwa  $\Delta T_{\varphi;MAX} = 0,1 \text{K}$  im Inneren der Interferometerbox beträgt, liegt die maximale, experimentell ermittelte, thermische Stabilität der ursprünglichen Interferometerboxen bei:

$$t_{\varphi;MAX} = \frac{\Delta T_{\varphi;MAX}}{|\nabla T|} \approx 35 \text{s} \quad (51)$$

**Theoriwert:** Die Berechnung des theoretischen Wertes für den Zeitraum der thermischen Stabilität der ersten Interferometerboxen erfolgt nach dem Prinzip, wie im Unterabschnitt „Temperaturstabilisierte Interferometerbox“ bereits beschrieben wurde. Folgende Werte sind bekannt:

Two-component-system

Volumen gesamt :	$V$	$0,00580 \text{m}^3$
Volumen Kupferblech:	$V_{KU}$	$0,00028 \text{m}^3$
Anteil Kupferblech:	$N_{KU}$	$\approx 4,8\%$
Dichte Luft :	$\rho_{LU}$	$1204 \text{kg/m}^3$
Dichte Kupfer:	$\rho_{KU}$	$8920 \text{kg/m}^3$
Spezifische Wärmekapazität Luft :	$c_{LU}$	$1005 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$
Spezifische Wärmekapazität Kupfer:	$c_{KU}$	$381 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$
Wärmestrom nach außen:	$P, \dot{Q}$	$-29 \text{W} \equiv -29 \text{J/s}$

Damit ist der Temperaturgradient respektive die thermische Trägheit ermittelbar über:

$$\nabla T = \frac{\dot{Q}}{V \cdot (c_{KU} \cdot N_{KU} + c_{LU} \cdot (1 - N_{KU})) \cdot (\rho_{KU} \cdot N_{KU} + \rho_{LU} \cdot (1 - N_{KU}))}$$

$$\Rightarrow \nabla T = -3,3 \text{mK/s} \quad (52)$$

Analog zum Experimentalwert kann nun die maximal, zeitliche Stabilität berechnet werden:

$$t_{\varphi;MAX} = \frac{\Delta T_{\varphi;MAX}}{|\nabla T|} \approx 31 \text{s} \quad (53)$$

Der theoretisch und der experimentell bestimmte Wert stimmen gut überein. Es kann von einer thermischen Stabilität der Interferometerboxen 1. Generation von mindestens 30s ausgegangen werden. Für die Interferometerboxen 2. Generation wird eine thermische Stabilität von 79s erwartet, was einer Verbesserung um das 2,5-fache entspräche.

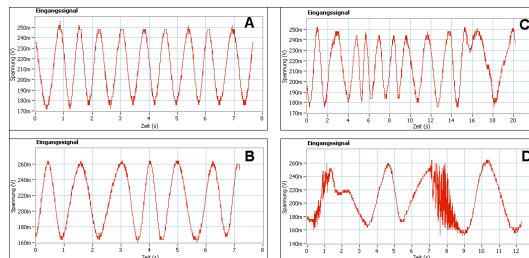


### 3.1.3 Die optische Stabilität

Für die Interferometer 1. Generation war keine Stabilisierung der optischen Ausgangsleistung auf einen gewünscht definierten Wert vorgesehen. Daher wurde kein Versuch durchgeführt, um die optische Stabilität zu prüfen. Dennoch konnten schon beim Umgang mit diesen Interferometern drei grundlegende Anforderungen an die Interferometer 2. Generation heraus gearbeitet werden.

Optical  
stability

- Die optische Ausgangsleistung darf **keine transienten Sprünge** aufweisen. Vorliegende Interferometer konnten diese Anforderung nicht erfüllen. In den Aufnahmen zeigten sich in großer Anzahl solcher Sprünge.
- Die optische Ausgangsleistung soll nach (z. B. thermischer Anregung) eine sinusoidale Grundschwingung möglichst **ohne störenden Oberwellenanteil** aufzeigen. Aus nicht näher evaluierten Gründen wechselten sich jedoch Bereiche geringer Oberwellen mit solchen hohen Anteils ab.
- Die optische Ausgangsleistung ist maximal inert gegen mechanischen bzw. akustischen auf die Interferometer einwirkende Schwingungen, bedeutet **minimale Fasermikrofonie**<sup>1</sup>. Die Interferometer 1. Generation zeigten eine bemerkenswerte Empfindlichkeit gegenüber tiefen akustischen Frequenzen, so dass oftmals Messungen wiederholt werden mussten.



Beispiel für verschieden beobachtete optische Stabilitäten an den Interferometern der 1. Generation.

**A** = ein optimal stabiles optisches Signal am Ausgang der Interferometer.

**B** = ein optisches Signal, mit Oberwellen belastet.

**C** = Transienten innerhalb des Ausgangssignals.

**D** = die beobachtete starke Empfindlichkeit gegenüber akustischen Schwingungen, der oben genannten Fasermikrofonie.

<sup>1</sup>Bei der Messung der Visibilität der vorhandenen Interferometer ist eine starke Mikrofonie für (akustische) Schwingungen aus der Umgebung aufgefallen. Diese Empfindlichkeit war so stark, dass eine normale Unterhaltung innerhalb des Labors zu Schwankungen im Messergebnis führte und Publikumsverkehr im Flur die Messergebnisse unablesbar machten. Folgende Gründe könnten für diesen Effekt in Betracht kommen:

- Störstellen, wie Mikrorisse, Versetzungen o. ä. innerhalb der Faser, welche eine Abhängigkeit von Faserbewegungen infolge äußerer Schwingungen besitzen und die Lichtleitung bzw. Visibilität beeinflussen infolge Dämpfung. Eine zusätzliche Dämpfung innerhalb eines Interferometerarms führt zu einer Visibilitätsänderung. (siehe §6, Anhang Herleitungen.)
- Erzwungene Faserschwingungen von außen führen zu Resonanzeffekten. Die dabei auftretenden großen Auslenkungen der Faser aus der Normallage führen zu einer Spannungsänderung innerhalb der Faser. Auftretende Biege- oder Normalspannungen verändern die Dämpfungswerte mit den gleichen Konsequenzen.
- Erzwungene Faserschwingungen von außen führen zu Resonanzeffekten. Die dabei auftretenden großen Auslenkungen der Faser aus der Normallage führen zu einer Spannungsänderung innerhalb der Faser. Infolge der Materialkonstanten Elastizitätsmodul -  $E$  und Querdehnungsbeiwert -  $\nu$  kommt es zu einer Bogenlängenänderung der Faser. Diese Änderung von  $d_L$  führt zu einer Visibilitätsänderung.

### **3.2 Synthese der Interferometer 2. Generation**

Die nun vorliegenden Interferometer 2. Generation werden den gleichen Test unterzogen, wie die Interferometer 1. Generation. Ziel ist es zu zeigen, dass man Interferometer in Time- Bin- Konfiguration in ihrer optischen Ausgangsleistung stabilisieren kann, um diese dann gezielt und definiert über den EO(P)M anzusteuern.

### 3.2.1 Die Visibilität

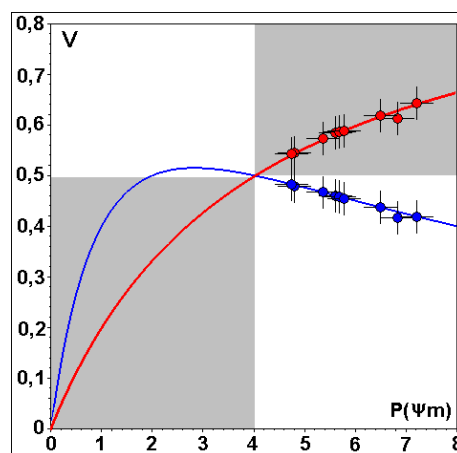
Die Visibilität der Interferometer 2. Generation soll im Folgenden aufgelistet werden. Im Laufe der Darstellung der faserbasierenden Interferometer stellten sich verschiedene technologische Hindernisse auf. Größtes war die genaue Längung der Interferometerarme im Millimeterbereich. Visibility

Messung	MAX	MIN	V
1	0,396	0,104	0,584
2	0,368	0,100	0,573
3	0,400	0,104	0,587
4	0,408	0,120	0,545
5	0,424	0,096	0,613
6	0,408	0,096	0,619
7	0,424	0,092	0,643
8	0,432	0,128	0,543
∅	0,408	0,105	0,588

Die ermittelten MAX- und MIN- Werte und die daraus berechneten Visibilitäten und dessen **Maximalwert**.  
Im Gegensatz zu den Visibilitätsmessungen an den Interferometern 1. Generation betrug hier die Temperatur aus technologischen Gründen konstant bei 20°C.

Messung	V	TBK	$\tilde{V}$	$P(\psi_m)$
1	0,584	0,788	0,460	5,614
2	0,573	0,815	0,467	5,362
3	0,587	0,780	0,458	5,692
4	0,545	0,882	0,480	4,803
5	0,613	0,679	0,416	6,337
6	0,619	0,706	0,437	6,499
7	0,643	0,651	0,419	7,217
8	0,543	0,889	0,483	4,749
∅	0,588	0,772	0,454	5,702

Die berechneten fehlerkorrigierten Visibilitäten und dessen **Maximalwert**.



Die **gemessene**  $V$  und die **fehlerkorrigierte Visibilität**  $\tilde{V}$  grafisch dargestellt.

Die fehlerkorrigierten Visibilitäten  $\tilde{V}$  der Interferometer 2. Generation zeigen eine leichte, unerhebliche Verringerung im Vergleich zu den Interferometern 1. Generation. Die Verbesserung des Time-Bin- Kriteriums  $TBK$  bedeutet, dass die Interferometer nutzbar in Time- Bin- Konfiguration arbeiten. Eine Aussage über die Temperaturabhängigkeit kann nicht gegeben werden.

Time- bin- criterion

Betrachtet man die Visibilitäten in der grafischen Darstellung, ist zu erkennen, dass gemessene  $V$  und fehlerkorrigierte Visibilität  $\tilde{V}$  gut nebeneinander liegen. Dies zeigt ein  $TBK$  von  $\approx 1$  an. Die doch recht große Abweichung zwischen den experimentellen Mess- und den theoretischen Erwartungswerten sind erklärbar. Die unterschiedlichen Amplituden in den Interferometerarmen sind unter anderen Ursachen erklärbar durch die unterschiedliche Anzahl von Spleißen, welche ein doch erheblichen und dann messbaren Dämpfungs- respektive  $P(\psi_m)$ - Einfluss besitzen.

### 3.2.2 Die thermische Trägheit

Für die Interferometer der 2. Generation ist die praktische Ermittlung der Thermischen Trägheit vonnöten. Der theoretisch berechnete Wert ist angegeben mit:

Thermal inertia

$$t_{\varphi;MAX} \approx 79s \quad (54)$$

Dies soll mittels Messung im Experiment überprüft werden. Dazu wurde das zu untersuchende Interferometer, eingebaut in der Thermobox, aufgeheizt auf etwas über den Sollwert von  $50^{\circ}\text{C}$  und danach abgekühlt. In unregelmäßigen Abständen wurden Messwerte aufgenommen. Nach circa 1,5 Stunden konnte dieser Vorgang unterbrochen werden, da genügend genaue Messwerte vorhanden waren um exponential regressieren zu können bis zu einer Abkühlung auf  $20^{\circ}\text{C}$ . Aus der Regressionsgleichung ermittelte sich dann die Gesamtzeit der Abkühlung und somit der experimentelle Wert der Thermischen Trägheit. Der vollständige Vorgang wiederholte sich analog für das zweite Interferometer mit gleichem Ergebnis für  $\nabla T$ .

$$\nabla T = -1,28\text{mK/s} \quad (55)$$

⇒

$$t_{\varphi;MAX} = \frac{\Delta T_{\varphi;MAX}}{|\nabla T|} \approx 78s \quad (56)$$

Der Wert für  $\nabla T$  wurde aus folgenden Messwerten gewonnen.

Nr:	$t$ [s]	$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Nr:	$t$ [s]	$T$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	0	50,47	8	3793	44,26
2	1384	48,75	9	4177	43,60
3	1694	48,15	10	4451	43,15
4	2171	47,22	11	4657	42,81
5	2677	46,24	12	4944	42,36
6	2887	45,87	13	5337	41,75
7	3261	45,18	—	—	—

Die ermittelten Temperaturen  $T$  zum Zeitpunkt  $t$ , hier für eine Thermobox 2. Generation mit eingebauten Interferometer zwecks Ermittlung der Thermischen Trägheit.

Mittels einer geeigneten Software wurde aus den Werten der Tabelle die exponentielle Regression durchgeführt mit dem Ergebnis:

$$T = 50,5 \cdot e^{-39 \cdot 10^{-6} \cdot t} \quad (57)$$

Die vollständige Abkühlung wird mit  $T = 20^{\circ}\text{C}$  angenommen. Dies erfolgte nach der Zeit  $t_{20^{\circ}\text{C}}$ :

$$t_{20^{\circ}\text{C}} \approx 23750s \equiv 6,6\text{h}$$

Somit ist auch  $\nabla T$  und letztendlich erwartetes  $t_{\varphi;MAX}$  ermittelt:

$$\nabla T = \frac{50,47 - 20,00}{0 - t_{20^{\circ}\text{C}}}$$

### 3.2.3 Die optische Stabilität

Es wurde aufgezeichnet, dass der Piezoelektrische Stabilisator in zwei Modi arbeiten kann:

- **Als grob einstellendes Element**, der PES beeinflusst die Phase außerhalb von  $-\pi$  bis  $+\pi$ .
- **Als fein einstellendes Element**, der PES beeinflusst die Phase innerhalb von  $-\pi$  bis  $+\pi$ .

Optical stability

Letzterer Modus erfordert einen ADC am Detektor und einen DAC am Hochspannungsnetzteil mit mindestens 11-Bit Auflösung. Die Entwicklung der elektronischen Schaltungen und Boards ist Aufgabe einer externen Gruppe. Um überhaupt nachweisen zu können, dass eine Stabilisierung der optischen Ausgangsleistung mittels eines faserbewickelten Piezorings möglich ist, wurde ein kommerziell erhältlicher 8-Bit DAC bzw. ADC genutzt. Dadurch ist jedoch nur ein Betrieb als grob auflösendes Element mit seinen bekannten Konsequenzen möglich.

Als grob auflösendes Element ist es nicht technologisch machbar die Phase direkt zu beeinflussen, um konstruktive oder destruktive Interferenz einzustellen mit dem Ziel, die optische Ausgangsleistung stabilisieren zu können auf einen gewünschten Wert. Grob auflösend bedeutet, der Detektor erkennt einen Wert, der aus dem Interferometer austretenden Intensität, der Regelkreis ermittelt, ob zu *hoch* oder zu *niedrig* gegenüber einem Sollwert, gibt (hier) eine Regelausgangsspannung aus, die den faserbewickelten Piezoring kontrahieren oder sich ausdehnen lässt mit anschließender Auswertung ob Erfolg oder Irrtum. Bei letzteren wird das *Krement* beibehalten, ansonsten invertiert um anschließend den Regelerfolg erneut auszuwerten.

Damit der grob auflösende Regelkreis nicht in kürzester Zeit aussetzt, infolge zum Beispiel einer Regelbereichsüberschreitung oder aus anderen Gründen ist die Ist-Wert-Ermittlung integrativ ausgeführt mit den frei programmierbaren Werten der Integrations-schrittweite  $S$  und der Regler-Zeitkonstante  $T$ . Die Ermittlung dieser Werte und die Einstellung des Regelkreises an sich sind im Versuch erprobt.

Die Konsequenz der Nutzung von  $S$  ist jedoch im Vorherein schon abschätzbar. Jede Änderung der Phase innerhalb der Interferometer in Time-Bin-Konfiguration, respektive der optischen Ausgangsleistung, innerhalb des Integrationsintervalls des I-Gliedes wird durch den Regelkreis nicht erkannt, mit der Wirkung, dass die Restwelligkeit am Detektor nicht gegen Null gehen kann - daher auch die Bezeichnung *grob einstellend* des hier genutzten Modus vom PES.

Im folgenden Verlauf liegt ein dimensionierter, mit 8-Bit auflösender digital programmierter Regelkreis vor. Folgende Wirkungen sind zu erwarten:

- **Stabilisierung** der Größe der Schwankungen der optischen Ausgangsleistung der Interferometer 2. Generation *zwischen* MIN und MAX - Varianz -  $I_\varphi$
- **Stabilisierung** der Schwankungen der optischen Ausgangsleistung der Interferometer *auf den Durchschnitt* von MIN und MAX - Mittelwert -  $U_\phi/U_-$

Beide Wirkungen werden getrennt betrachtet, experimentell ermittelt und ausgewertet.

**Beeinflussung der Varianz - die optische Stabilität -  $I_\varphi$ :** Es ist eine Größe definiert, mit der man die *Varianz* eines Messsignals abschätzen kann -  $I_\varphi$

$$I_\varphi = q_u = 2 \cdot \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} \tag{58}$$

Variance

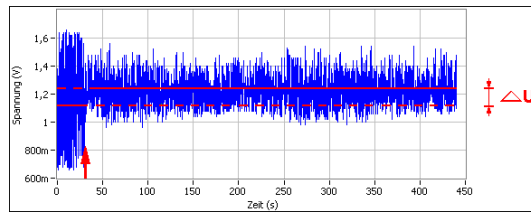
Nicht zu verwechseln mit der Visibilität  $V$  wird der Wert  $I_\varphi \rightarrow 0$ , wenn die Wirkung des Regelkreises ideal ist, das heißt, die Restwelligkeit  $q_u$  des Signals am Detektor gegen Null geht. Für einen grob einstellenden PES wird dies jedoch nicht erreichbar sein.

$I_\varphi$	
Ohne Stabilisierung	Mit Stabilisierung
$I_{\varphi;Maximal} = 0,426$	$I_{\varphi;Optimal} = 0,242$

Die Wirkung des Piezoelektrischen Stabilisators auf  $I_\varphi$  eines Messsignals.

Die Nutzung des Piezoelektrischen Reglers zeigt eindeutig eine Regelwirkung. Die alleinige Betrachtung von  $I_\varphi$  ist jedoch nicht ausreichend, um von einer guten optischen Stabilisierung sprechen

zu können. Wie folgendes Bild zeigt, entsteht durch die Nutzung des Regelkreises eine bleibende Regelabweichung  $\Delta U$ . Um diese Abweichung charakterisieren zu können, muss die mathematisch-physikalische Größe  $U_{\circ}/U_{-}$  eingeführt werden.



Die Wirkung des Piezoelektrischen Phasenstabilisators grafisch dargestellt. Zur Messzeit  $t \approx 30s$  **roter Pfeil** setzt die Regelwirkung ein, mit der Konsequenz, dass sich die Varianz des optischen Ausgangssignals am Detektor verkleinert, jedoch der Mittelwert um  $\Delta U = 0,101V$  versetzt wird.

**Beeinflussung des Mittelwerts - die optische Stabilität -  $U_{\circ}/U_{-}$ :** Aus voran gegangenen Abschnitt ist bekannt, dass eine unerwünschte Regelabweichung  $\Delta U$  infolge der Nutzung des PES auftritt. Um diese Abweichung charakterisieren und minimieren zu können, wurde der Quotient  $U_{\circ}/U_{-}$  eingeführt. Analog  $I_{\varphi}$  sind auch hier folgende Werte im Anschluss der durchgeführten Versuchsdurchläufe auflistbar:

Average

$I_{\varphi}$	
Ohne Stabilisierung	Mit Stabilisierung
$U_{\circ}/U_{-} = 1,020$	$U_{\circ}/U_{-} = 1,001$
Maximal	Optimal

Die Wirkung des Piezoelektrischen Stabilisators auf  $U_{\circ}/U_{-}$  eines Messsignals.

Betrachtet man die Herleitung von  $U_{\circ}/U_{-}$ , wird ersichtlich, dass für ein ideales  $U_{\circ}/U_{-}$  gilt:

$$\left(\frac{U_{\circ}}{U_{-}}\right)_{\text{Ideal}} = 1 \tag{59}$$

Wobei  $U_{\circ}$  durch das Auswertungsprogramm des Detektorsignals ermittelt und für  $U_{-}$  als Berechnungsgrundlage angenommen wird:

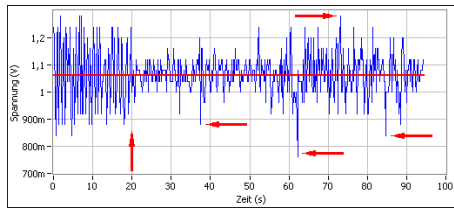
$$U_{-} = \frac{MAX + MIN}{2} \tag{60}$$

Daher geht  $U_{\circ}/U_{-} \rightarrow 1$ , wenn keine bleibende Regelabweichung  $\Delta U$  mehr detektierbar ist. Folgendes Abbild zeigt die Wirkung des PES auf ein optisches Ausgangssignal der Interferometer 2. Generation in Time- Bin- Konfiguration. Es ist keine Regelabweichung  $\Delta U$  des Signals erkennbar, also  $U_{\circ}/U_{-} \approx 1$  gilt, dafür der Wert von  $I_{\varphi}$  weit vom Optimum entfernt ist, da offensichtlich zwischen den Zeiten  $t_A = 60s$  und  $t_E = 90s$  große Werte von  $P(\psi_m)$  auftreten, welche das eigentliche Wirkungsziel des Piezoelektrischen Phasenstabilisators sind.

Eine wichtige Rolle für das Endergebnis, eine möglichst gute optische Stabilisierung des Ausgangssignals vorliegender Interferometer 2. Generation, ist die Einstellung der Referenzspannung am ADC, direkt hinter dem Detektor.

**Beeinflussung des Regelergebnisses durch die Referenzspannung:** Wurde der Regelkreis des PES mittels Versuche ordnungsgemäß dimensioniert und programmiert, verblieb nur noch die Einstellung der Referenz des ADC am Detektor. Eine ungünstige Einstellung der Referenzspannung für den ADC verschob nicht nur  $\Delta U$  in ungünstige Bereiche, sondern bewirkte auch, dass  $I_{\varphi}$  sich verschlechterte, da bei zu kleiner Referenz die auftretenden MAX- Werte im optischen Ausgangssignal „übersehen“ werden. Das Einstellen der Referenzspannung wird im Versuch vorgenommen. Deshalb folgt lediglich die Auswirkung einer ordentlich eingestellten Referenzspannung am ADC auf  $U_{\circ}/U_{-}$  und  $I_{\varphi}$ .

Reference voltage



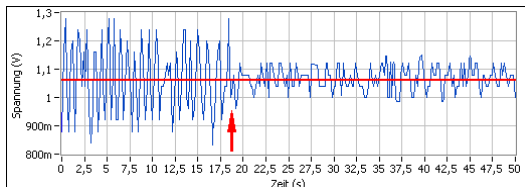
Die Wirkung des Piezoelektrischen Phasenstabilisators grafisch dargestellt. Zur Messzeit  $t \approx 20s$  **roter senkrechter Pfeil** setzt die Regelwirkung ein, mit der Konsequenz, dass sich die Varianz des optischen Ausgangssignals am Detektor verkleinert, der Mittelwert sich jedoch (fast) nicht ändert. Bild entspricht dem Messdurchlauf eines Versuchs. Die **roten horizontalen Pfeile** kennzeichnen einige der hier unregulierten MAX- oder MIN- Spitzen.

Wurde die Referenzspannung exakt eingestellt, kann nun die optimale Wirkung des äußeren Regelkreises ausgemessen werden.

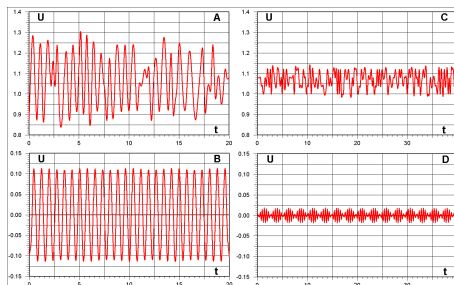
Diese hier aufgelisteten Werte von  $U_{\phi}/U_{-}$  und  $I_{\phi}$  sollen visuell verdeutlicht werden, um die Möglichkeiten, selbst eines grob einstellenden Piezoelektrischen Phasenstabilisators aufzuzeigen.

MAX [V]	MIN [V]	$U_{\phi}$ [V]	$U_{-}$ [V]	$I_{\phi}$	$U_{\phi}/U_{-}$
1,130	0,990	1,069	1,060	0,132	1,008

Die erreichbaren Werte der optischen Stabilisierung durch den äußeren Regelkreis vom Piezoelektrischen Stabilisator als grob einstellendes Element.



Die Wirkung des Piezoelektrischen Phasenstabilisators in optimaler Einstellung dimensioniert grafisch dargestellt. Zur Messzeit  $t \approx 18s$  **roter Pfeil** setzt die Regelwirkung ein.



Detaillierte Teildarstellungen obiger Abbildung. Einheiten: Zeitachse - Zeit  $t$  in [s] und Messachse - Spannung  $U$  in [V]. **A** = Ungeregeltes Ausgangssignal am Detektor - entspricht dem Zeitintervall von  $0 \leq t \leq 20s$ , **B** = Die in Abschnitt A enthaltene (thermisch angeregte) Eigenfrequenz der Interferometer zum Zeitpunkt der Messung von  $\approx 1,3Hz$ , **C** = Geregeltes Ausgangssignal am Detektor - entspricht dem Zeitintervall von  $20 \leq t \leq 60s$ , **D** = Die in Abschnitt B enthaltene Eigenfrequenz zurück gewonnen. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Zeitachse zwischen den Teilabbildungen **A+B** mit  $2,5s/div$  und **C+D** mit  $5,0s/div$ .

Frequency beat

Die zum Zeitpunkt der Messung induzierte Eigenfrequenz der Interferometer in Teilabbildung **B** zeigt eine *Schwebung* mit einer Hüllkurvenfrequenz von  $f_S \approx 0,2Hz$ . Die resultierende Summenfrequenz beträgt  $f_R \approx 2,3Hz$ . Mit den Definitionen für  $f_S, f_R$  können die ursächlichen Frequenzen  $f_1, f_2$  rekonstruiert werden.

$$f_S = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad \Leftrightarrow \quad f_R = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (61)$$

$\Rightarrow$

$$f_1 \approx 2,5Hz \quad \Leftrightarrow \quad f_2 \approx 2,1Hz$$

Alias- effect

$f_1$  ist die doppelte Eigenfrequenz der Interferometer vor der Regelung und  $f_2$  die Abtastfrequenz des ADC am Detektor zum Zeitpunkt der Messung. Die Konsequenz, dass  $f_2 < f_1$  hier gilt, beschreibt der *Alias- Effekt*. Die Frequenz  $f_1$  kann dazu genutzt werden, die Wirksamkeit des Regelkreises in Bezug der Dämpfung auszumessen.

Der Regelkreis unter Einsatz eines faserbewickelten Piezorings dämpft die Interferometereigenfrequenz um  $-15,6db$ .



---

	ohne Regelung	mit Regelung
$f_1$	240 mV	40 mV
$f_1$	47,6 db	32,0 db
	<b>-15,6 db</b>	

Messwerte der Frequenz  $f_1$  in [mV] und [db] (bezogen auf 1mV) vor- und nach Regeleinsatz.

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>

