
Aufbau und Analyse eines Sagnac-Interferometers für Experimente mit Multiphoton-Verschränkung

Julian Schimek



München 2011

Aufbau und Analyse eines Sagnac-Interferometers für Experimente mit Multiphoton-Verschränkung

Julian Schimek

Bachelorarbeit
an der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von
Julian Schimek

München, den 9.12.2011

Korrektor: Prof. Dr. Harald Weinfurter

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	3
2.1	Zustandsdarstellung	3
2.1.1	Polarisation und räumliche Moden	3
2.1.2	Zusammengesetzte Systeme	4
2.2	Das Sagnac-Interferometer	5
2.2.1	Grundsätzlicher Aufbau	5
2.2.2	Berechnung des Endzustands	5
2.2.3	Phasenschub des Glasplättchens	8
3	Bau des Interferometers	13
3.1	Versuchsanordnung und Bauteile	13
3.2	Aufbau und Justage	14
3.3	Messungen an relevanten Bauteilen	15
3.4	Charakterisierung des Interferometers	16
3.4.1	Visibility	16
3.4.2	Stabilität	20
4	Experiment	25
4.1	Durchführung	25
4.2	Auswertung	25
5	Zusammenfassung und Ausblick	33
A	Anhang	35
A.1	Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 3.4.2	35
A.2	Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 3.4.1	36
A.3	Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 4.2	37

Kapitel 1

Einleitung

Polarisationsunabhängige, verstellbare Strahlteiler haben Anwendungen in der Quantenmetrologie, Quantensimulation und bei Quantencomputern. Eine mögliche Umsetzung ist ein Mach-Zehnder-Interferometer, in dem ein variabler Phasenunterschied zwischen den beiden Armen eingestellt werden kann. Über den Phasenunterschied können die Photonen auf die beiden Ausgänge aufgeteilt werden[4].

Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau eines solchen verstellbaren Strahlteilers, wie er zum Beispiel bei der Präparation von Multiphoton-Verschränkung genutzt werden kann. Hier wird der verstellbare Strahlteiler aber durch ein Sagnac-Interferometer realisiert. Bei dieser Art Interferometer sind die beiden Arme identisch und werden in entgegengesetzter Richtung durchlaufen, was sich positiv auf die Stabilität auswirkt. Der Phasenunterschied der beiden Arme wird durch Verdrehen eines Glasplättchens herbeigeführt.

Im Theorieteil wird die Darstellung eines zusammengesetzten quantenmechanischen Zustands eingeführt. Die Versuchsanordnung wird skizziert und der im Interferometer erzeugte Zustand berechnet. Außerdem wird eine Beziehung für den durch das Glasplättchen induzierten Phasenschub hergeleitet. Im dritten Kapitel wird die Vorgehensweise bei Aufbau und Justage des Interferometers erläutert und dessen Güte analysiert. Dazu wird die Qualität der Interferenz durch Messung der Visibility bestimmt und die Stabilität über den Zeitraum eines Tages gemessen. Im vierten Kapitel wird schließlich überprüft, wie gut die erzeugten Zustände mit den in Kapitel 2 berechneten übereinstimmen. Dies geschieht durch Messung der H- und V-Polarisationskomponenten an einem Ausgang, wobei 21 verschiedene Kombinationen von eingestrahelter Polarisation und Wellenplättchenstellung untersucht werden.

Kapitel 2

Theorie

In diesem Abschnitt wird die Darstellung von Photonen, auf denen Information über die Polarisation und räumliche Mode kodiert wird (Qubit), eingeführt. Daraufhin wird das Prinzip des Sagnac-Interferometers beschrieben, die im Experiment erzeugten Endzustände berechnet und hergeleitet, wie sich die Interferenz durch Verdrehen eines Glasplättchens in einem Arm beeinflussen lässt.

2.1 Zustandsdarstellung

2.1.1 Polarisation und räumliche Moden

Die Realisierung eines Qubits erfolgt mittels eines Systems zweier unterschiedlicher Zustände, die Basisvektoren eines zweidimensionalen Hilbertraums darstellen. Nach dem Superpositionsprinzip ist auch jede normierte Linearkombination dieser Basisvektoren ein zulässiger Quantenzustand[2]. Eine mögliche Darstellung eines solchen Zustands ist:

$$|\Psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \quad (2.1)$$

Wegen $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ ist dieser Zustand normiert. $e^{i\phi}$ gibt den Phasenunterschied zwischen den Basisvektoren $|0\rangle$ und $|1\rangle$ an. Eine globale Phase wird außer Acht gelassen, da sie bei der physikalischen Messung (entspricht Betragsquadratbildung) verschwindet[5]. Zur Beschreibung des Polarisationszustandes eines Photons bieten sich drei Sätze Basisvektoren an: $|H\rangle$ und $|V\rangle$ für horizontale und vertikale Polarisation, $|+\rangle$ und $|-\rangle$ für diagonale und antidiagonale Polarisation und schließlich $|L\rangle$ und $|R\rangle$ für links-/rechtszirkuläre Polarisation. Werden $|H\rangle = |0\rangle$ und $|V\rangle = |1\rangle$ gewählt, lassen sich die Basisvektoren $|+\rangle$, $|-\rangle$, $|L\rangle$ und $|R\rangle$ gemäß 2.1 in der horizontal/vertikal-Basis ausdrücken:

$$\begin{aligned} |+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle + |V\rangle), & |-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle - |V\rangle) \\ |L\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle + i|V\rangle), & |R\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle - i|V\rangle) \end{aligned}$$

Da im Rahmen dieser Arbeit alle Winkel bezüglich vertikaler Polarisation gemessen werden, wird in der horizontal/vertikal-Basis gearbeitet. Wenn $|H\rangle$ und $|V\rangle$ explizit als Vektoren geschrieben werden sollen, wird gewöhnlicherweise $|H\rangle$ mit $(1, 0)_p$ und $|V\rangle$ mit $(0, 1)_p$ identifiziert. Der Index „p“ gibt an, dass es sich um einen Polarisationszustand handelt. Fasst man die Winkel θ und ϕ als Koordinaten auf, lassen sich die Zustände auf der Oberfläche der sogenannten Bloch-Kugel visualisieren (vgl. 2.1).

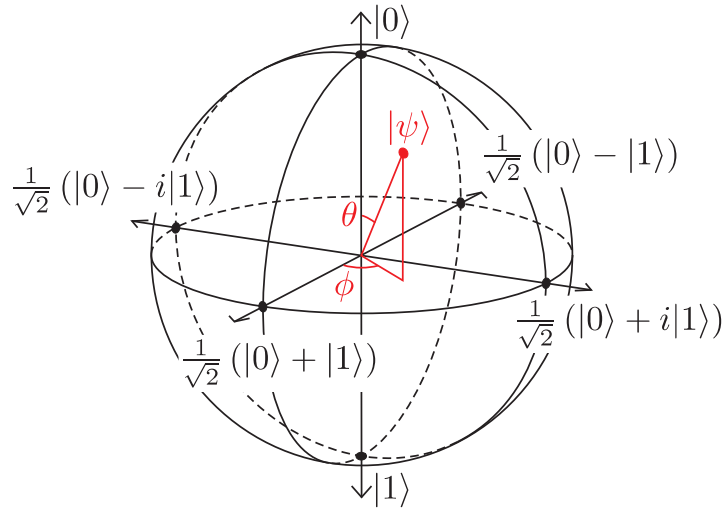


Abbildung 2.1: Darstellung eines Zustands auf der Blochkugel. Bild aus [9]

In einem Interferometer können Photonen auf zwei verschiedenen Wegen, genannt räumliche Moden, propagieren, was neben der Polarisation einen zusätzlichen Freiheitsgrad darstellt. In diesem Fall können die räumlichen Moden analog zur Polarisation als Zweiniveausystem aufgefasst werden. Als orthonormale Basisvektoren können $|a\rangle = (1, 0)_r$ und $|b\rangle = (0, 1)_r$ verwendet werden[6], wobei a und b für die Arme des Interferometers stehen.

2.1.2 Zusammengesetzte Systeme

Der Hilbertraum \mathcal{H} eines aus n Teilsystemen zusammengesetzten Systems ist das Tensorprodukt der Hilberträume der Teilsysteme \mathcal{H}_i :

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2 \otimes \dots \otimes \mathcal{H}_n$$

Der Zustand des Gesamtsystems kann dann über das Tensorprodukt der Basen $|\phi_{i_j}\rangle$ der Teilsysteme ausgedrückt werden[8]:

$$|\Psi\rangle = \sum_{i_1, \dots, i_n} b_{i_1, \dots, i_n} |\phi_{i_1}\rangle \otimes |\phi_{i_2}\rangle \otimes \dots \otimes |\phi_{i_n}\rangle$$

Für eine bessere Lesbarkeit wird das Tensorproduktzeichen \otimes in Zukunft nicht mehr angeschrieben. Die Dimension des Gesamtraumes ist das Produkt der Dimensionen der Teilräume. Bei den Teilsystemen kann es sich um mehrere unterscheidbare Photonen[8] handeln oder um Photonen und deren räumliche Moden[3].

Ein Beispiel für die Verknüpfung von Polarisation und räumlicher Mode ist der 50:50 Strahlteiler. Licht in einem Polarisationszustand $|P\rangle$ wird in den Strahlteiler auf einer Seite (Eingang 1) eingestrahlt und dann gleichmäßig auf beiden räumlichen Moden a und b aufgeteilt. Die Polarisation wird dabei nicht verändert:

$$|P\rangle |1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|P\rangle |a\rangle + i |P\rangle |b\rangle)$$

Bei der Reflexion in die räumliche Mode b kommt es dabei zu einem Phasensprung von i [1].

2.2 Das Sagnac-Interferometer

2.2.1 Grundsätzlicher Aufbau

Im Gegensatz zu anderen Interferometern, wie z.B. dem Michelson-Interferometer, läuft das Licht im Sagnac-Interferometer in den beiden Armen a und b nicht auf zwei unterschiedlichen Wegen. Stattdessen wird derselbe Weg in unterschiedlicher Richtung durchlaufen. Dies wird dadurch realisiert, dass das Licht, welches an einem Strahlteiler aufgeteilt wird, über drei Spiegel zurück auf den Strahlteiler gelenkt wird. Dabei trifft das Licht aus einem Arm auf die Seite des Strahlteilers, durch die das Licht des anderen Arms diesen verlassen hat (vgl. Abbildung 2.2). Der Vorteil dieser Anordnung ist, dass die Interferenz aufgrund der gleichen durchlaufenen Wege inhärent stabil ist.

Das Interferometer verfügt über je zwei Eingänge (1 und 2) und Ausgänge (1' und 2'). Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur Eingang 1 genutzt. Als weitere Komponenten befinden sich ein Glasplättchen und ein Halbwellenplättchen im Arm a des Interferometers. Durch das Glasplättchen kann der Phasenunterschied zwischen den beiden Armen geregelt werden, wodurch die Aufteilung der Photonen auf die beiden Ausgänge reguliert werden kann. Das Halbwellenplättchen dient dazu, die Polarisation des Lichtes im Arm a zu drehen. Vor dem Interferometer befindet sich ein Polarisator, mit dem die Polarisation des eingestrahlt Lichts festgelegt wird. Um das Wellenplättchen und das Glasplättchen nur auf einen Arm des Interferometers wirken zu lassen, bedarf es einer minimalen Trennung der beiden durchlaufenen Wege. Dies wird durch nichtzentrales Einstrahlen in den Strahlteiler und die Positionierung der Spiegel erreicht.

2.2.2 Berechnung des Endzustands

Um die Funktion des Interferometers zu überprüfen, sollen im Experiment verschiedene Endzustände erzeugt werden. Dies erfolgt durch Variation der Eingangspolarisation und

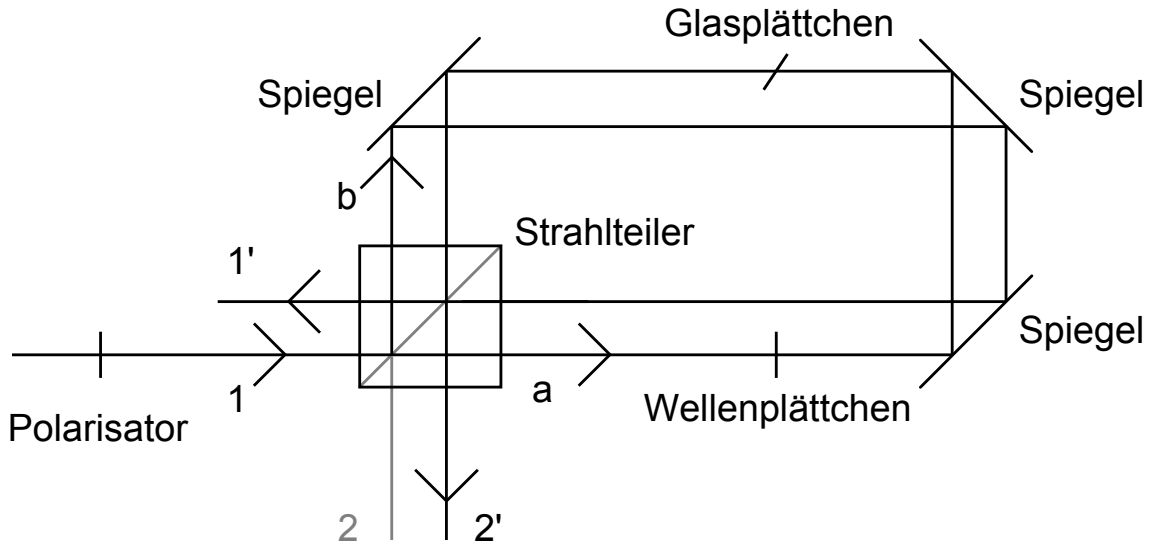


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau des Interferometers

der Stellung des Wellenplättchens. Deshalb wird an dieser Stelle der Endzustand abhängig vom Polarisationswinkel β , Wellenplättchenwinkel γ und Phasenunterschied der Arme Φ berechnet.

Die Transformation eines Polarisationszustands durch ein Halbwellenplättchen mit der schnellen Achse unter dem Winkel θ bzgl. $|H\rangle$ ist gegeben durch[10]:

$$\begin{aligned} |H\rangle &\rightarrow \cos 2\theta |H\rangle + \sin 2\theta |V\rangle \\ |V\rangle &\rightarrow \sin 2\theta |H\rangle - \cos 2\theta |V\rangle \end{aligned}$$

Im Experiment wird der Winkel γ bzgl. $|V\rangle$ gemessen. Hier gilt die gleiche Transformation, lediglich die Vorzeichen werden umgedreht¹:

$$\begin{aligned} |H\rangle &\rightarrow -\cos 2\gamma |H\rangle - \sin 2\gamma |V\rangle \\ |V\rangle &\rightarrow -\sin 2\gamma |H\rangle + \cos 2\gamma |V\rangle \end{aligned} \quad (2.2)$$

Der Anfangszustand ist von der Form

$$|\Psi_{in}\rangle = v |V\rangle - h |H\rangle$$

mit $v = \cos \beta$, $h = \sin \beta$, wobei β der Winkel der Eingangspolarisation bzgl. $|V\rangle$ ist. Die Winkel β , γ und θ sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Der Strahlteiler teilt das Licht zu gleichen Teilen in die räumlichen Moden a und b des Interferometers auf. In a wird transmittiert, in b reflektiert. Dadurch kommt es zu einem Phasensprung von i im Arm b :

$$(v |V\rangle - h |H\rangle) |1\rangle \xrightarrow{50:50 \text{ BS1}} \frac{1}{\sqrt{2}} [(v |V\rangle - h |H\rangle) |a\rangle + i(v |V\rangle - h |H\rangle) |b\rangle]$$

¹ $\gamma + \frac{\pi}{2} = \theta$; $\cos 2\theta = \cos(2\gamma + \pi) = -\cos 2\gamma$ etc.

Die Phasenschübe der Reflexionen an den Spiegeln betreffen beide Arme gleich und können als globale Phase aufgefasst werden. Das Wellenplättchen transformiert das Licht in Arm a wie in 2.2 beschrieben:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}} [(v|V\rangle - h|H\rangle)|a\rangle + i(v|V\rangle - h|H\rangle)|b\rangle] \\ \xrightarrow{HWP(\gamma)} & \frac{1}{\sqrt{2}} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle]|a\rangle + i(v|V\rangle - h|H\rangle)|b\rangle] \end{aligned}$$

Hierbei wurden die Koeffizienten $c = \cos 2\gamma$ und $s = \sin 2\gamma$ eingeführt. Der Arm a bekommt durch das Glasplättchen einen relativen Phasenschub $\Phi(\alpha)$ gegenüber Arm b :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle]|a\rangle + i(v|V\rangle - h|H\rangle)|b\rangle] \\ \xrightarrow{GP} & \frac{1}{\sqrt{2}} [e^{i\Phi(\alpha)} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle]|a\rangle + i(v|V\rangle - h|H\rangle)|b\rangle] \end{aligned}$$

Beim zweiten Durchgang durch den Strahlteiler wird das Licht auf die beiden Ausgänge $1'$ und $2'$ verteilt, bei den Reflexionen kommt es wieder zu Phasensprüngen von i :

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{2}} [e^{i\Phi(\alpha)} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle]|a\rangle + i(v|V\rangle - h|H\rangle)|b\rangle] \\ \xrightarrow{50:50 BS^2} & \frac{1}{2} [ie^{i\Phi(\alpha)} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle] + i(v|V\rangle - h|H\rangle)] |1'\rangle \\ & + \frac{1}{2} [e^{i\Phi(\alpha)} [(vc + hs)|V\rangle + (hc - vs)|H\rangle] - (v|V\rangle - h|H\rangle)] |2'\rangle \\ & = |\Psi_{end}\rangle \end{aligned}$$

Dies ist der Zustand, nachdem das Licht das Interferometer durchlaufen hat. Wird im Experiment ein Ausgang analysiert, so entspricht dies der Projektion des Zustands auf diese räumliche Mode. Analoges gilt für die Verwendung eines Polarisators. Im Experiment sollen die H - und V -Komponente von Ausgang $1'$ untersucht werden. Dies liefert die beiden Zustände:

$$\begin{aligned} |\Psi_{1'}^V\rangle &= |V\rangle |1'\rangle \langle V | \langle 1' | \Psi_{end}\rangle = \frac{1}{2} [ie^{i\Phi(\alpha)} (vc + hs) + iv] |V\rangle |1'\rangle \\ |\Psi_{1'}^H\rangle &= |H\rangle |1'\rangle \langle H | \langle 1' | \Psi_{end}\rangle = \frac{1}{2} [ie^{i\Phi(\alpha)} (hc - vs) - ih] |H\rangle |1'\rangle \end{aligned} \quad (2.3)$$

Die relativen Ausgangsleistungen² erhält man schließlich durch Betragsquadratbildung:

$$\begin{aligned} P_{rel}^V &= \langle \Psi_{1'}^V | \Psi_{1'}^V \rangle = \frac{1}{4} [(vc + hs)^2 + v^2 + 2v(vc + hs) \cos \Phi(\alpha)] \\ P_{rel}^H &= \langle \Psi_{1'}^H | \Psi_{1'}^H \rangle = \frac{1}{4} [(hc - vs)^2 + h^2 - 2h(hc - vs) \cos \Phi(\alpha)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

²d.h. auf Eingangsleistung normiert

Nr.	Pol.winkel β	Wp.winkel γ	P_{rel}^V	P_{rel}^H
1	0°	0°	$0.5 + 0.5 \cos \Phi(\alpha)$	0
2	15°		$0.4665 + 0.4665 \cos \Phi(\alpha)$	$0.0335 - 0.0335 \cos \Phi(\alpha)$
3	30°		$0.375 + 0.375 \cos \Phi(\alpha)$	$0.125 - 0.125 \cos \Phi(\alpha)$
4	45°		$0.25 + 0.25 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 - 0.25 \cos \Phi(\alpha)$
5	60°		$0.125 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$	$0.375 - 0.375 \cos \Phi(\alpha)$
6	75°		$0.0335 + 0.0335 \cos \Phi(\alpha)$	$0.4665 - 0.4665 \cos \Phi(\alpha)$
7	90°		0	$0.5 - 0.5 \cos \Phi(\alpha)$
8	0°	30°	$0.3125 + 0.25 \cos \Phi(\alpha)$	0.1875
9	15°		$0.3583 + 0.3415 \cos \Phi(\alpha)$	$0.1417 + 0.0915 \cos \Phi(\alpha)$
10	30°		$0.375 + 0.375 \cos \Phi(\alpha)$	$0.125 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$
11	45°		$0.3583 + 0.3415 \cos \Phi(\alpha)$	$0.1417 + 0.0915 \cos \Phi(\alpha)$
12	60°		$0.3125 + 0.25 \cos \Phi(\alpha)$	0.1875
13	75°		$0.25 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 - 0.125 \cos \Phi(\alpha)$
14	90°		0.1875	$0.3125 - 0.25 \cos \Phi(\alpha)$
15	0°	45°	0.25	0.25
16	15°		$0.25 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$
17	30°		$0.25 + 0.2165 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 + 0.2165 \cos \Phi(\alpha)$
18	45°		$0.25 + 0.25 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 + 0.25 \cos \Phi(\alpha)$
19	60°		$0.25 + 0.2165 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 + 0.2165 \cos \Phi(\alpha)$
20	75°		$0.25 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$	$0.25 + 0.125 \cos \Phi(\alpha)$
21	90°		0.25	0.25

Tabelle 2.1: Übersicht über die relativen Leistungen der 21 Einstellungen

Zu erwarten sind also Oszillationen mit $\Phi(\alpha)$, deren Amplitude und Offset von der eingestrahlten Polarisation und Einstellung des Wellenplättchens abhängen. Im Experiment werden sieben Polarisationsrichtungen und drei Stellungen des Wellenplättchens verwendet. Explizite Ausdrücke für die relativen Leistungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

In den Einstellungen 1, 7, 8, 12, 14, 15 und 21 verschwindet die Amplitude des Oszillation im Leistungsverlauf mindestens einer Polarisationsrichtung. Hier sind also konstante Verläufe zu erwarten. Bei V -Polarisation hat der \cos -Anteil immer ein positives Vorzeichen. Bei $\Phi(\alpha) = \pi$ treten daher immer Minima auf. Bei H -Polarisation hingegen wechselt das Vorzeichen, abhängig von der Einstellung gibt es ein Minimum oder Maximum bei $\Phi(\alpha) = \pi$.

2.2.3 Phasenschub des Glasplättchens

Zur Analyse des Zustands sind Messungen mit verschiedenen Phasendifferenzen zwischen den beiden möglichen Wegen nötig. Die Umsetzung einer verstehllbaren Phasendifferenz erfolgt durch ein verdrehbares Glasplättchen im Arm a . Der Brechungsindex des Plättchens weicht von dem der Luft ab, wodurch sich die optischen Weglängen der beiden Arme un-

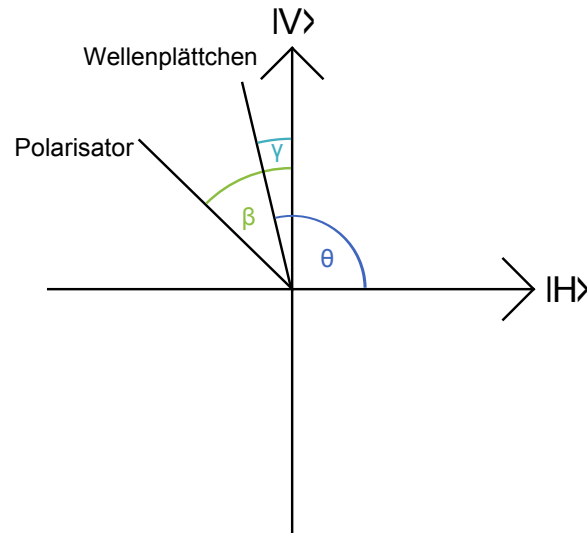


Abbildung 2.3: Definition der Winkel

terscheiden. Eine Drehung des Glasplättchens ändert aufgrund von Brechung den genauen Weg im Plättchen. Der Phasenschub gegenüber Arm b lässt sich berechnen, indem man einen Ausdruck für die unterschiedlichen optischen Weglängen abhängig vom Drehwinkel des Plättchens herleitet (siehe Abbildung 2.4):

Der Strahl fällt unter dem Winkel α auf das Glasplättchen der Dicke d und mit dem Brechungsindex n . Durch Brechung verläuft der Strahl im Plättchen unter dem Winkel ϵ . Die darin zurückgelegte Strecke $s(\epsilon)$ ist dann:

$$s(\epsilon) = \frac{d}{\cos \epsilon}$$

Der Winkel ϵ lässt sich mit dem Brechungsgesetz ($n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \epsilon$ [11]) und $n_1 = n_{Luft} \approx 1$, $n_2 = n$ durch α ausdrücken:

$$s(\alpha) = \frac{d}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}}$$

Die zugehörige optische Weglänge erhält man durch Multiplikation mit dem Brechungsindex. Die Differenz der optischen Weglängen zwischen einer beliebigen Stellung des Plättchens und $\alpha = 0$ ist:

$$ns(\alpha) - ns(0) = nd \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}} - 1 \right)$$

Die Weglängendifferenz kann dann in eine Phasendifferenz umgerechnet werden, indem

man mit $\frac{2\pi}{\lambda}$ multipliziert, wobei λ die Lichtwellenlänge ist. So erhält man schließlich:

$$\Phi(\alpha) = \frac{2\pi nd}{\lambda} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}} - 1 \right) + \delta \quad (2.5)$$

δ ist hierbei die Phasendifferenz der beiden Wege bei $\alpha = 0$. Sie kommt zustande durch das Glasplättchen an sich, Ungenauigkeiten beim Aufbau und Unterschiede zwischen den beiden Armen (z.B. ein Wellenplättchen, das nur in einem Arm durchquert wird). Taylorentwicklung zeigt, dass sich 2.5 bei größeren Winkeln durch eine quadratische Funktion approximieren lässt, um 56° durch eine lineare.

In Abbildung 2.5 ist der Verlauf der Leistung, der z.B. bei Messung des V -Anteils in Einstellung 1 erhalten wird, dargestellt. Hierbei wurde $\lambda = 780 \text{ nm}$, $d = 0.1 \text{ mm}$ und $n = 1.52$ gewählt. Der Winkel der Glasplättchens geht dabei von -45° bis $+45^\circ$. δ wurde auf 0 gesetzt. Man erkennt ein breites Maximum bei 0° . Danach nähert sich der oszillierende Verlauf langsam einem sinusförmigen an. Im Allgemeinen ist δ allerdings kein ganzzahliges Vielfaches von 2π . Dadurch kommt es zu einem nicht voll ausgeprägtem Extremum bei $\alpha = 0$ und Versatz der Extrema.

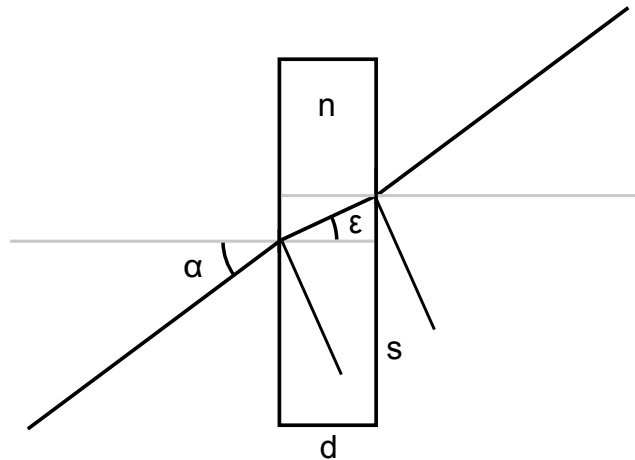


Abbildung 2.4: Skizze zum Strahlengang am Glasplättchen

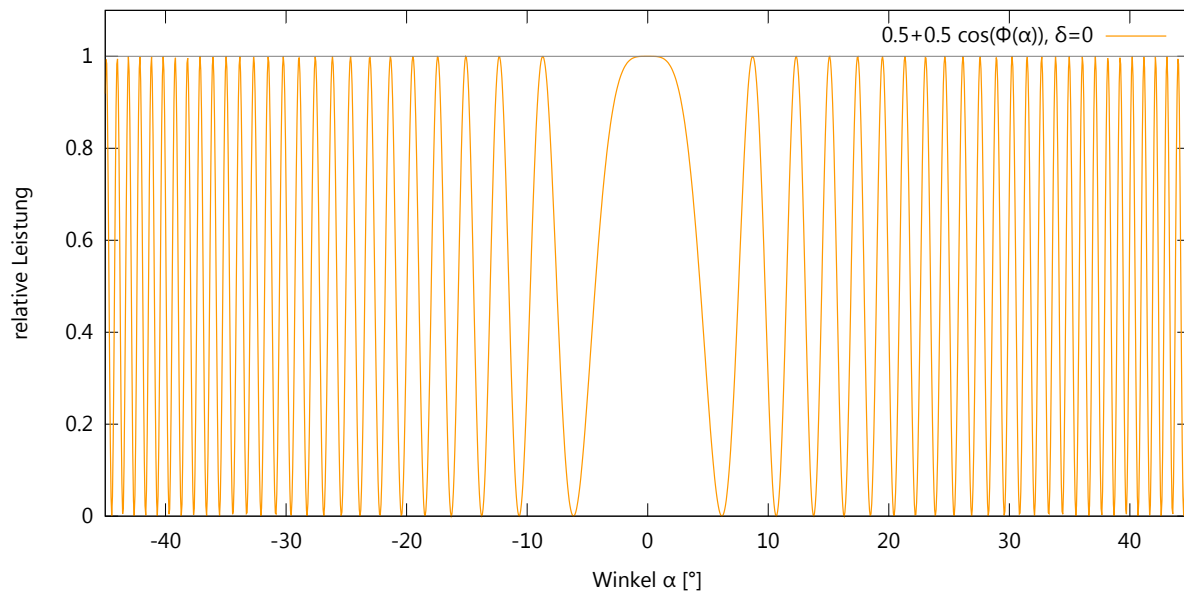


Abbildung 2.5: Beispiel für den Verlauf der Leistung abhängig von der Stellung des Glaspättchens

Kapitel 3

Bau des Interferometers

In diesem Abschnitt wird die experimentelle Versuchsanordnung und Vorgehensweise beim Aufbau des Interferometers erläutert. Außerdem werden die verwendeten Bauteile und das Interferometer bezüglich ihrer Güte analysiert.

3.1 Versuchsanordnung und Bauteile

Der komplette Versuchsaufbau besteht neben dem Interferometer an sich noch aus Bauteilen zur Analyse und zum Einstrahlen des Lichts in das Interferometer. Die Lichtquelle ist ein frequenzstabilisierter 780 *nm*-Diodenlaser. Über eine Singlemode-Glasfaser wird das Licht zum Versuchsaufbau geleitet. Die Faser durchläuft einen Polarisationsregler¹, mit dessen Hilfe die Polarisation so voreingestellt werden kann, dass die Verluste im Polarisator (POL) minimal werden. Kurz vor dem Polarisator befindet sich der Faserkoppler mit verstellbarem Fokus, durch den das Licht die Faser verlässt.

Das Interferometer ist gegenüber der Beschreibung in Abschnitt 2.2 um ein zweites Glasplättchen (GP2) ergänzt. Es dient zum Ausgleich des optischen Weglängenunterschied zwischen den beiden Armen, der durch das verstellbare Glasplättchen (GP1) und das Wellenplättchen (HWP) hervorgerufen wird. Bei Verwendung des Diodenlasers ist dies aufgrund der hohen Kohärenzlänge optional. Falls später ein *f*s-Laser verwendet werden soll, ist es jedoch erforderlich, ein zweites Glasplättchen mit geeigneter Dicke zu verwenden, da ansonsten keine Interferenz beobachtet werden kann². Das verstellbare Glasplättchen ist auf einem computergesteuerten Schrittmotor aufgeklebt. Eine volle Umdrehung von 360° entspricht 19200 Schritten. Das zweite Glasplättchen ist fix auf einem Post aufgeklebt. Außerdem sind die beiden Spiegel auf der rechten Seite durch ein Reflexionsprisma ersetzt, was als Retroreflektor die Justage erleichtert und gleichzeitig die Stabilität erhöht. Der

¹In den drei Plättchen wird die Faser je zwei mal/ein mal/zwei mal gewickelt. Durch die mechanischen Spannungen wird die Faser doppelbrechend. Die drei Plättchen wirken dann wie eine Anordnung von zwei Viertelwellenplättchen und einem Halbwellenplättchen dazwischen. Ein Verkippen der Plättchen entspricht dem Verdrehen der schnellen Achse. So kann die Polarisation beliebig verdreht werden.

²Mit kurzer Überlegung lässt sich erkennen, dass die beiden optischen Weglängen im Interferometer gleich sind und der einzige Unterschied in Glas- und Wellenplättchen besteht.

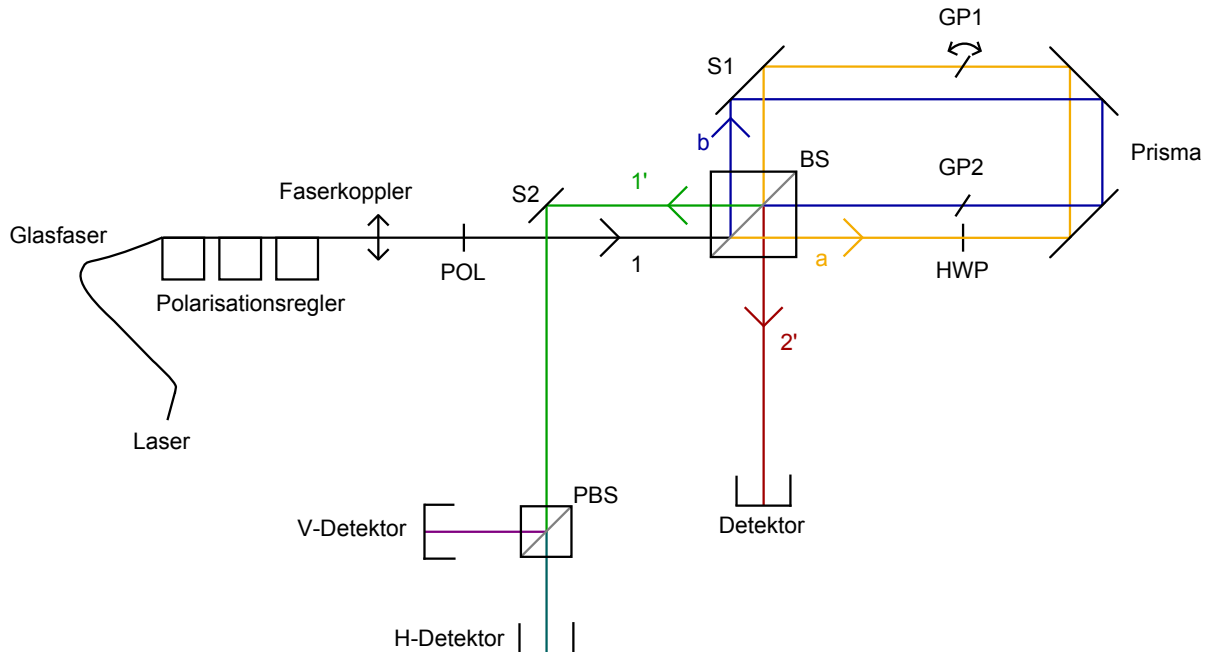


Abbildung 3.1: Schematische Übersicht über den kompletten Versuchsaufbau

Spiegel (S1) über dem Strahlteiler (BS) dient zur Justage des Überlapps der Moden am Strahlteiler.

In den Ausgängen 1' und 2' folgt schließlich noch die Analysesektion. Das Licht aus der Mode 1' muss mit einem kleinen Spiegel (S2) abgelenkt werden, da eine Analyse direkt nach dem Strahlteiler dem einlaufenden Licht den Weg versperren würde. Es folgt ein polarisierender Strahlteiler (PBS), der den vertikal polarisierten Anteil des Lichts reflektiert und den horizontalen transmittiert. Als Detektoren können Photodioden oder eine CCD-Kamera genutzt werden. In Ausgang 2' findet keine nach Polarisation aufgeteilte Analyse statt, sondern das Licht trifft direkt auf den Detektor (wenn benötigt). Eine Übersicht über den kompletten Versuchsaufbau befindet sich in Abbildung 3.1.

3.2 Aufbau und Justage

Beim Aufbau des Interferometers wurde wie folgt vorgegangen: Zuerst wurde der Auskoppler von Eingang 1 aufgebaut und der Fokus so eingestellt, dass der Strahl möglichst kollimiert ist. Danach wurde der Polarisator hinzugefügt und der Koppler so ausgerichtet, dass der Strahl einerseits parallel zur Tischoberfläche und andererseits parallel zu einer Tischkante lief. Als nächstes wurde der Strahlteiler eingebaut und so ausgerichtet, dass das reflektierte Licht in einem Winkel von 90° zum transmittierten Licht und parallel zur Tischoberfläche lief. Dann wurde das Prisma eingebaut. Da es sich hierbei um einen Retroreflektor handelt, musste nur die vertikale Ausrichtung eingestellt werden. Darauf folgte

der Spiegel S1, der auf einem Verschiebetisch montiert war. Die erste grobe Ausrichtung erfolgte hier so, dass die beiden Strahlen in einem Ausgang möglichst gut überlappten. Der Verschiebetisch dient dazu, den Spiegel komfortabel so weit wie möglich in die Anordnung zu bringen, um die Arme des Interferometers maximal zu separieren. Als letzte Komponente folgte der Motor mit dem aufgeklebten Glasplättchen und das fixe Glasplättchen. Die wichtigsten Bauteile des Interferometers (Auskoppler, Spiegel, Strahlteiler, Prisma, Polarisator und Glas- und Wellenplättchen) wurden auf einem $30 \cdot 30 \text{ cm}$ -Breadboard montiert um die Stabilität zu erhöhen. Da der Motor im Betrieb leichte Vibrationen aufwies, wurde er neben dem Breadboard montiert.

Das verdrehbare Glasplättchen der Dicke $d \approx 0.1 \text{ mm}$ wurde auf einen Winkel von ca. 30° gestellt. Unter diesem Winkel lässt sich 2.5 sehr gut als quadratische Funktion approximieren. Weiterhin ist diese Stellung noch weit genug vom Brewsterwinkel ($n = 1.52$, $\theta_B = 56.7^\circ$) entfernt, sodass die horizontalen und vertikalen Anteile nicht mit stark unterschiedlicher Effizienz reflektiert werden.

Nach dem grundsätzlichen Aufbau und der groben Vorjustage erfolgte die Feineinstellung. Mit einer CCD-Kamera konnte in Ausgang 1' der Strahlüberlapp und die Interferenz beobachtet werden, mit einem Power Meter in Ausgang 2' wurde gleichzeitig die Leistung gemessen. Zuerst wurde der Strahlüberlapp mit Hilfe der Kamera am Spiegel eingestellt. Danach wurde das Glasplättchen so gedreht, dass die Leistung am Power Meter minimal war (konstruktive Interferenz an der Kamera) und dann die Einstellung von Spiegel, Strahlteiler und Prisma optimiert. Die Interferenz reagierte sehr stark auf horizontale Verstellung von Spiegel und Strahlteiler und deutlich weniger empfindlich auf vertikale Verstellung von Spiegel, Strahlteiler und Prisma. Diese Vorgehensweise wurde mehrfach wiederholt, bis keine Verbesserung mehr erzielt werden konnte.

Das Wellenplättchen wurde nur bei Bedarf eingebaut. Es musste jeweils mit der Kamera kontrolliert werden, dass es zu keinen Beugungserscheinungen an dessen Halterung kam.

3.3 Messungen an relevanten Bauteilen

Die Qualität der verwendeten Bauteile beeinflusst maßgeblich die Effizienz des Interferometers und die Güte der Interferenz. Deshalb wurde die Reflexion und/oder Transmission von Spiegeln, Glasplättchen, Prisma und Strahlteiler unter Verwendung von vertikal polarisiertem Licht gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Reflexionsgrade der Spiegel betragen annähernd 100%. Das Prisma verfügt schon über eine Antireflexbeschichtung für 780 nm , eine Verbesserung wäre hier nur durch Ersetzen mit zwei Spiegeln möglich. Dies könnte allerdings Aufbau und Justage erschweren und die Anfälligkeit gegenüber mechanischen Störungen erhöhen. Beim Strahlteiler³ ließ sich ein Unterschied zwischen Transmission und Reflexion feststellen. Je nachdem, welcher Ausgang betrachtet wird, wird dieser beim zweiten Durchlauf durch den Strahlteiler aufgehoben (1')

³Da für Seite Z zuerst deutlich von den anderen Seiten abweichende Werte gemessen wurden, wurde die Messung zu einem späteren Zeitpunkt bei niedrigerer Leistung wiederholt.

oder weiter verstärkt (2'). Für die größten Verluste von bis zu gut 15% sorgen die beiden Glasplättchen. Eine Antireflexbeschichtung sollte die Verluste deutlich senken können.

Bei Spiegeln und Prisma wurde zusätzlich die Drehung der Polarisation gemessen. Hierfür wurde zunächst ein zweiter Polarisator senkrecht zum V-Polarisator gestellt und ein Halbwellenplättchen dazwischen so eingestellt, dass die Polarisation nicht gedreht wurde. Dann wurde das Licht an dem zu untersuchenden Bauteil reflektiert und beobachtet, wie weit das Wellenplättchen rotiert werden musste, um nach dem zweiten Polarisator wieder ein Minimum zu erhalten. Es konnte bei allen untersuchten Bauteilen eine Polarisationsdrehung festgestellt werden. Sie war jedoch so gering, dass sie mit der verwendeten Halterung des Wellenplättchens (ein Skalenstrich alle 2°) nicht quantifiziert werden konnte. Als obere Grenze für die Polarisationsdrehung wird deshalb 1° (entspricht 0.5° Drehung des Wellenplättchens) angenommen.

Außerdem wurden zwei polarisierende Strahlteiler für die Analyse eines Ausgangs untersucht. Hier ergab sich eine Reflexion (Transmission) von annähernd 100% für vertikal (horizontal) polarisiertes Licht und verschwindende Transmission (Reflexion).

Mit den gemessenen Werten berechnet sich die Transmission des Interferometers an den Ausgängen 1' und 2' über die Interferometermoden a und b zu:

$$\begin{aligned} T_{1'}^a &= 0.491 \cdot 0.981 \cdot 0.848 \cdot 0.477 = 0.195 \\ T_{1'}^b &= 0.473 \cdot 0.981 \cdot 0.914 \cdot 0.491 = 0.194 \\ T_{2'}^a &= 0.491 \cdot 0.981 \cdot 0.848 \cdot 0.490 = 0.200 \\ T_{2'}^b &= 0.473 \cdot 0.981 \cdot 0.914 \cdot 0.469 = 0.199 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Hierbei wurden Strahlteiler, Prisma und Glasplättchen beachtet. Auf allen vier möglichen Wegen weicht die Transmission deutlich vom Idealwert 25% nach unten ab.

Schließlich wurde auch noch das Rauschen, der Offset und der Umrechnungsfaktor von Spannung zu Leistung der Photodioden bestimmt. Das Rauschen ist hierbei die Standardabweichung der Diodenspannung bei Abdunkelung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 zu sehen. Bei allen Rechnungen mit Werten der Photodioden wurde der Offset abgezogen. Das Rauschen erwies sich als unabhängig vom Umgebungslicht.

3.4 Charakterisierung des Interferometers

3.4.1 Visibility

Die Visibility ist ein Maß für die Güte der Interferenz. Sie ist definiert als[7]

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{3.2}$$

mit I_{max} und I_{min} als maximale bzw. minimale Intensität an einem Ausgang des Interferometers. Bei perfekter Interferenz ($I_{min} = 0$) nimmt sie den Wert 1 an, ohne Interferenz ($I_{max} = I_{min}$) den Wert 0.

Bauteil	P_{ein} [μW]	P_{aus} [μW]	Reflexion/Transmission
Spiegel	1649	1649	$\approx 100\%$ ref.
Kleiner Spiegel	195.5	194.4	99.4% ref.
Prisma	211	207	98.1% ref.
Glasplättchen 1 (ca. 30°)	59.7	50.6	84.8% trans.
Glasplättchen 2 (ca. 0°)	383	350	91.4% trans.
Strahlteiler (siehe Abbildung 3.2)			
Seite W ref.	1494	706	47.3% ref.
Seite W trans.		733	49.1% trans.
Seite X ref.	1495	713	47.7% ref.
Seite X trans.		733	49.0% trans.
Seite Y ref.	1490	703	47.2% ref.
Seite Y trans.		733	49.2% trans.
Seite Z ref.	81.2	38.1	46.9% ref.
Seite Z trans.		39.9	49.1% trans.

Tabelle 3.1: Transmission und Reflexionen der Bauteile

Diode	Offset [V]	Rauschen [V]	μW pro V
1	+0.1471	0.0075	31.7
2	-0.0326	0.0249	28.1
3	-0.0618	0.0488	4.2

Tabelle 3.2: Offset, Rauschen und Umrechnungsfaktoren der drei verwendeten Dioden

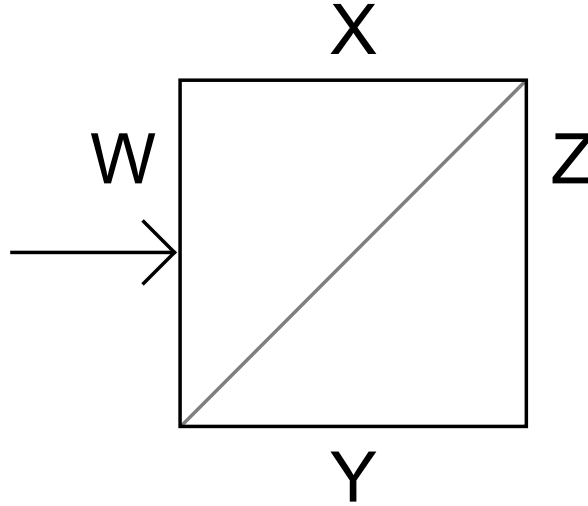


Abbildung 3.2: Benennung der Seiten des Strahlteilers. Der Pfeil kennzeichnet die Seite, von der Licht eingestrahlt wird.

Im realen Interferometer beeinträchtigen z.B. ein nicht perfekter Strahlüberlapp und die ungleichmäßige Aufteilung des Lichtes die Interferenz und senken dadurch die Visibility. Zur Messung der Visibility wird das Glasplättchen auf verschiedene Stellungen gedreht, sodass ein Intervall von etwa 2π in $\Phi(\alpha)$ abgedeckt wird. Dabei wird die Leistung am untersuchten Ausgang mit einer Photodiode aufgezeichnet. Den zu erwartenden relativen Leistungsverlauf der beiden Ausgänge in Abhängigkeit von $\Phi(\alpha)$ erhält man durch ähnliche, aber vereinfachte Rechnung wie in Abschnitt 2.4. Ohne Wellenplättchen und mit V -Polarisation gilt für den präparierten Zustand:

$$\begin{aligned}
 |\Psi_{in}\rangle &= |V\rangle |1\rangle \xrightarrow{50:50\ BS} \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle |a\rangle + i |V\rangle |b\rangle) \\
 &\xrightarrow{GP} \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\Phi(\alpha)} |V\rangle |a\rangle + i |V\rangle |b\rangle) \\
 &\xrightarrow{50:50\ BS} \frac{1}{2} [(ie^{i\Phi(\alpha)} + i) |V\rangle |1'\rangle + (e^{i\Phi(\alpha)} - 1) |V\rangle |2'\rangle] = |\Psi_{vis}\rangle
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Die relative Leistung an einem Ausgang erhält man wieder durch Projektion des Zustand auf den jeweiligen Ausgang und Bildung des Betragsquadrates:

$$\begin{aligned}
 P_{rel}^{1'} &= ||1'\rangle \langle 1'| \Psi_{vis}\rangle|^2 = \frac{1}{4} [(ie^{i\Phi(\alpha)} + i) (-ie^{-i\Phi(\alpha)} - i)] = \frac{1}{2} [1 + \cos \Phi(\alpha)] \\
 P_{rel}^{2'} &= ||2'\rangle \langle 2'| \Psi_{vis}\rangle|^2 = \frac{1}{4} [(e^{i\Phi(\alpha)} - 1) (e^{-i\Phi(\alpha)} - 1)] = \frac{1}{2} [1 - \cos \Phi(\alpha)]
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

In dieser Konfiguration ergeben sich also Sinusverläufe mit theoretischen Minimal- und Maximalwerten von 0 und 1. Die Gesamtleistung ist konstant.

Zur Berechnung der Visibility wird eine Sinusfunktion an die Messwerte angepasst. Dabei wird von einem quadratischen Zusammenhang zwischen Motorstellungen und Phasenunterschied ausgegangen. Aus den Fitparametern können dann U_{min} und U_{max} gewonnen werden (Spannung \sim Intensität \sim Leistung). Es wurde die Visibility an beiden Ausgängen gemessen.

Der Verlauf der Messwerte weicht stellenweise merklich von einem Sinus ab (siehe Abbildung 3.3). Die Ursache hierfür könnte an einer nicht ganz planen Oberfläche des Glasplättchens liegen. Die Abweichungen beeinflussen auch die Fitparameter und dadurch die Visibility, die auf kleine Änderungen insbesondere in U_{min} stark reagiert. Deshalb wurde die Visibility auch direkt aus den Messwerten der Photodiode berechnet. Die vier Werte für die Visibilitys V und deren Unsicherheiten ΔV sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Die Unsicherheiten wurden über das Rauschen der verwendeten Photodioden (Diode 2 an Ausgang 1', Diode 1 an Ausgang 2') und bei den Fits außerdem über die Unsicherheiten der Fitparameter abgeschätzt.

Mit den Werten aus 3.1 kann die theoretisch erreichbare Visibility für die beiden Ausgänge berechnet werden. Dabei werden die Wurzeln der jeweiligen Transmissionen bzw. Reflexionen anstelle der Koeffizienten 1 und $\frac{1}{\sqrt{2}}$ in Rechnung 3.3 eingesetzt⁴. Das Prisma wird auf allen vier Wegen durchlaufen und kann deshalb außer Acht gelassen werden, gleiches gilt für den Spiegel. Allerdings muss die Transmission des zweiten Glasplättchens beachtet werden:

$$\begin{aligned} |V\rangle |1\rangle &\rightarrow e^{i\Phi(\alpha)} \sqrt{W_t T_1} |V\rangle |a\rangle + i \sqrt{W_r T_2} |V\rangle |b\rangle \\ &\rightarrow i \left(e^{i\Phi(\alpha)} \sqrt{W_t X_r T_1} + \sqrt{W_r Z_t T_2} \right) |V\rangle |1'\rangle + \left(e^{i\Phi(\alpha)} \sqrt{W_t X_t T_1} - \sqrt{W_r Z_r T_2} \right) |V\rangle |2'\rangle \end{aligned}$$

T_1 und T_2 stehen für die Transmissionen der Glasplättchen, die Koeffizienten $W_{r,t}$, $X_{r,t}$ und $Z_{r,t}$ für die Reflexion/Transmission der jeweiligen Strahlteilerseite. Für die relativen Leistungen erhält man hieraus:

$$\begin{aligned} P_{rel}^{1'} &= W_t X_r T_1 + W_r Z_t T_2 + 2 \cos(\Phi(\alpha)) \sqrt{W_r W_t X_r Z_t T_1 T_2} \\ P_{rel}^{2'} &= W_t X_t T_1 + W_r Z_r T_2 - 2 \cos(\Phi(\alpha)) \sqrt{W_r W_t X_t Z_r T_1 T_2} \end{aligned}$$

Wenn man nun die Koeffizienten einsetzt und die minimalen bzw. maximalen relativen Leistungen berechnet, erhält man die theoretischen maximalen Visibilitys. Sie liegen für beide Ausgänge bei nahezu 100%, also deutlich über den im Experiment gemessenen.

Außerdem wurde verifiziert, dass die Gesamtleistung konstant ist, wie es aus Gleichung 3.4 folgt. Dazu wurden die Spannungen gemäß Tabelle 3.2 in Leistungen umgerechnet und diese addiert. Der Mittelwert der so berechneten Gesamtleistung beträgt $158.2 \mu W$, die Standardabweichung $4.0 \mu W$, also ca. 2.5% vom Mittelwert. Die Gesamtleistung ist also der Theorie entsprechend erhalten.

Nach Einbau des Wellenplättchen war es erforderlich, das Interferometer etwas nachzujustieren, da das zweite Glasplättchen bewegt werden musste und es zu einem leichten

⁴Der Zustand ist aufgrund der Verluste dann nicht mehr normiert.

Ausgang	Fit				direkt			
	U_{min} [V]	U_{max} [V]	V	ΔV	U_{min} [V]	U_{max} [V]	V	ΔV
1'	0.26	5.26	90.6%	4.6%	0.26	5.45	90.9 %	0.9%
2'	0.18	4.83	92.8%	4.0%	0.14	4.72	94.2 %	0.3%

Tabelle 3.3: Werte und Unsicherheiten der Visibility an den beiden Ausgängen

Strahlversatz kam. Dabei konnte eine Visibility von gut 96% an Ausgang 1' erzielt werden. Allerdings wurden die beiden Ausgänge nicht gleichzeitig, sondern mit zeitlichem Abstand und etwas anderer Eingangsleistung gemessen. Die entsprechenden Werte (beide Ausgänge mit und ohne Wellenplättchen) befinden sich in Tabelle 3.4, die dazugehörigen Graphen im Anhang. In dieser Einstellung wurden die Messungen im vierten Kapitel durchgeführt.

Möglicherweise kann die Visibility verbessert werden, indem das Licht der Ausgänge über eine Singlemode-Glasfaser zu den Photodioden geleitet wird und nicht direkt auf diese trifft. Mit der Kamera konnte bei den Minima eine deutliche Abweichung von einem Gaußprofil beobachtet werden. Durch die räumliche Filterung beim Einkoppeln in die Singlemode-Faser könnten diese Anteile entfernt und die Minimale Leistung gesenkt werden (vgl. [6]).

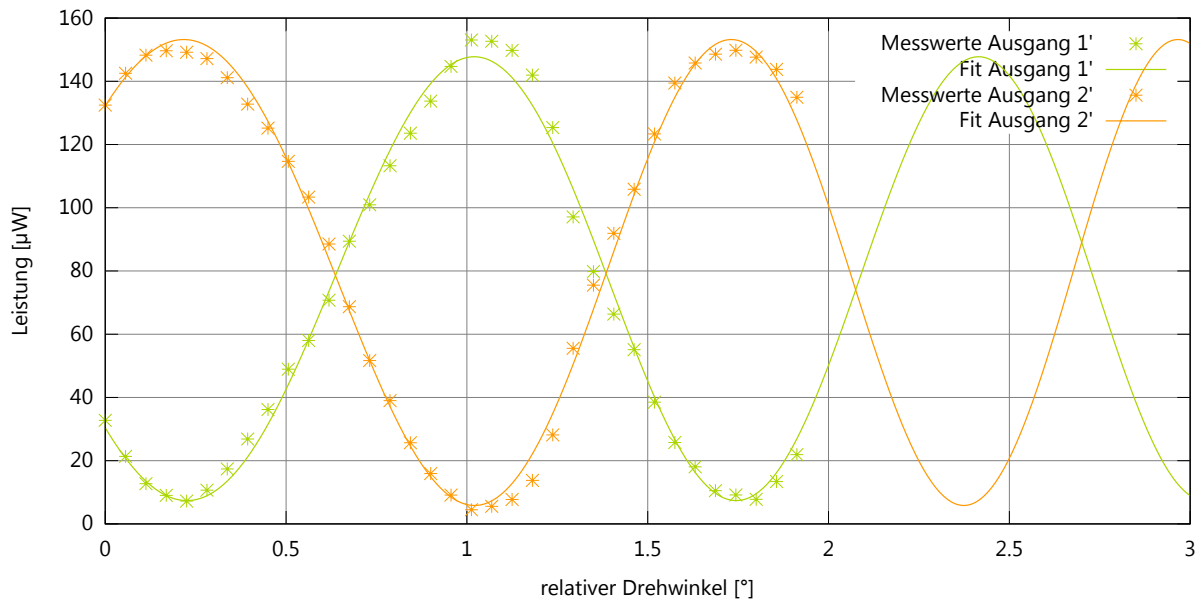


Abbildung 3.3: Visibilitys der beiden Ausgänge. Spannung in Leistung umgerechnet.

3.4.2 Stabilität

Eine wichtige Anforderung an ein Interferometer ist dessen Stabilität. Die Phasendifferenz und damit auch die Ausgangsleistung der beiden Arme muss zeitlich möglichst konstant

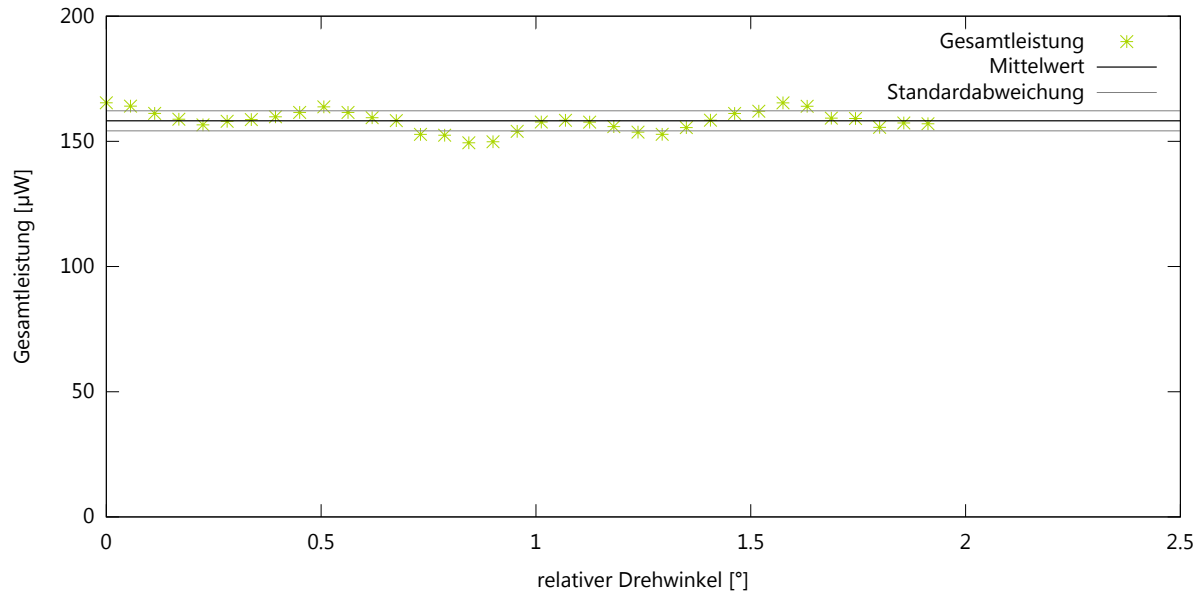


Abbildung 3.4: Die Gesamtleistung ist erhalten

Ausgang	Fit				direkt			
	U_{min} [V]	U_{max} [V]	V	ΔV	U_{min} [V]	U_{max} [V]	V	ΔV
1'	0.17	9.15	96.4%	1.9%	0.18	9.24	96.2%	0.7%
1' WP	0.50	9.01	89.5%	1.6%	0.27	8.94	94.1%	0.7%
2'	0.08	6.98	97.6%	2.0%	0.18	7.18	95.1%	0.8%
2' WP	0.22	7.35	94.2%	1.5%	0.18	7.37	95.2%	0.8%

Tabelle 3.4: Visibilitys in der Interferometereinstellung der 21 Messungen

sein. Auf kurzen Zeitskalen beeinflussen mechanische Störungen (Erschütterungen, Stöße) und Luftverwirbelungen die Stabilität. Über größere Zeiträume wirken sich vor allem Temperaturänderungen auf die Phasenstabilität aus.

Bei der Messung der Stabilität sollte der verwendete Laser in Leistung und Frequenz möglichst stabil sein. Schwankungen der eingestrahlenen Leistung können durch gleichzeitiges Messen selbiger oder Messung der Ausgangsleistung beider Ausgänge herausgerechnet werden.

Um die Stabilität zu messen, wurden Photodioden in beiden Ausgängen aufgestellt. Zusätzlich wurde ein Glasplättchen nach dem Polarisator installiert um über den Reflex den Verlauf der Eingangsleistung mit einer dritten Diode zu protokollieren. Eingangs- und Ausgangsleistungen wurden dann über mehrere Stunden aufgezeichnet. Das verdrehbare Glasplättchen wurde dabei so eingestellt, dass die relative Phasendifferenz zu Beginn der Messung ca. $\frac{\pi}{2}$ betrug, die Leistung also möglichst genau zwischen Minimum und Maximum lag. In diesem Bereich sind Instabilitäten am deutlichsten zu erkennen, da die Ausgangsleistung hier am stärksten von der Phasendifferenz abhängt. Zur Ermittlung der Phasenschwankung werden Mittelwert und Standardabweichung aus der gemessenen Spannung bestimmt. Mit $\cos(x + \frac{\pi}{2}) = -\sin x$ ergibt sich folgende Abhängigkeit der Leistung von der Phasenschwankung $\Delta\Phi$:

$$U(\Delta\Phi) = \frac{U_{max} + U_{min}}{2} - \frac{U_{max} - U_{min}}{2} \sin(\Delta\Phi) \quad (3.5)$$

Hier sind U_{max} und U_{min} die minimale und maximale Spannung der Photodiode.

Erste Messungen wiesen starke kurzzeitige Schwankungen und deutliche Langzeitdrifts (um 30% der Leistung bei Beginn der Messung) auf. Die kurzzeitigen Schwankungen konnten durch eine Umwandlung aus Blechabschirmungen und Abdecken mit einem dicken Tuch beseitigt werden. In einer Messung über 2-3 Minuten konnte die Standardabweichung der Spannung von Diode 1 von 0.0537 V auf 0.0079 V gesenkt werden. Siehe hierzu Abbildung 3.5.

Einbau eines Thermosensors hinter dem Prisma zeigte, dass die Langzeitdrifts die Folge von Temperaturänderungen waren. Mit einer Abdeckung aus einem Stück Karton und dem Tuch konnte eine gute Temperaturstabilität erreicht werden. Der Verlauf von Leistung an Ausgang 2' (Diode 1) und Temperatur ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Sobald alle Temperaturgradienten verschwunden sind, ist die Leistung sehr stabil. Die Spannungen U_{min} und U_{max} betragen ca. 0.140 V und 4.726 V. Mit der mittleren Spannung von 2.385 V ergibt sich eine mittlere Phase $\Phi' = \Phi - \frac{\pi}{2}$ von 0.0209 rad. Die Standardabweichung der mittleren Spannung von 0.036 V liefert mit 3.5 die Schwankung der Phase über einen Tag:

$$\Delta\Phi = 0.0157 \text{ rad} = 0.0050 \pi \quad (3.6)$$

Das Ergebnis ist gut und demonstriert die inhärente Stabilität des Sagnac-Interferometers. Andere Interferometertypen schneiden hier ohne aktive Stabilisierung schlechter ab (siehe z.B. [3]). Im Vergleich zu [6], wo auch mit einem Sagnac-Interferometer gearbeitet wurde, ist die Stabilität aber etwas schlechter (0.0113 rad gegen 0.0157 rad Schwankung). Dies

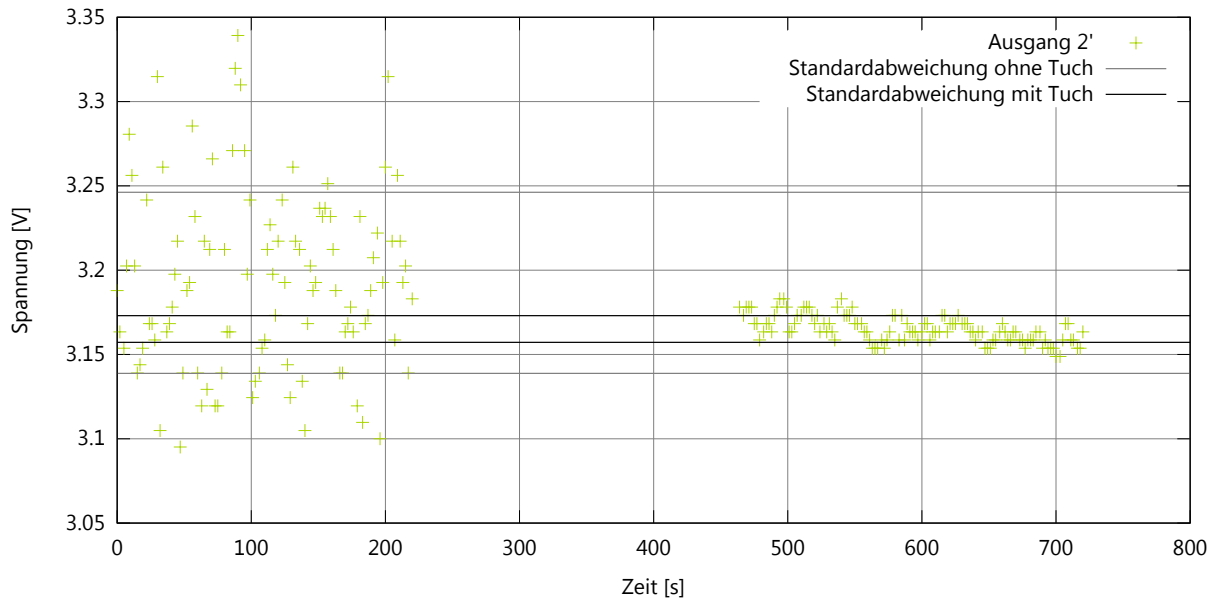


Abbildung 3.5: Einfluss der Abdeckung auf die Stabilität. Links Messung ohne, rechts mit Tuch

überrascht, da im Unterschied zu [6] auf einem gedämpften Tisch und mit einem thermisch isolierten Aufbau gearbeitet wird. Die Versuchsaufbauten sind vom Prinzip gleich, lediglich die Separation der Arme ist nun aufgrund des Wellenplättchens etwas größer. Es gilt zu beachten, dass in der Phasenschwankung auch das Rauschen der Diode und kleinere Schwankungen der Laserleistung⁵ enthalten sind.

Die Temperaturabhängigkeit des Interferometers wurde untersucht, indem der nur mit dem Tuch bedeckte Aufbau durch eine Lampe ein wenig erwärmt wurde. Nach Ausschalten der Lampe fiel die Temperatur langsam ab und mit ihr die Spannung der Photodiode. Die Eingangsleistung zeigte auch eine leichte Temperaturabhängigkeit. Vermutlich kommt es durch Wärmeausdehnung zu kleinen Polarisationsdrehungen in der Glasfaser. Die Spannung der Diode am Ausgang wurde diesbezüglich korrigiert. In Abbildung 3.7 lässt sich der Zusammenhang zwischen Leistung und Temperatur gut erkennen. Eine Temperaturänderung von ca. 0.65°C ging mit einer Spannungsänderung von ca. 0.7 V einher, was einer Phasenänderung von ungefähr 0.3 rad entspricht. Die Stabilität könnte durch eine geeignetere Abschirmung, z.B. eine Holzkiste, weiter erhöht werden, da die verwendeten Blechabschirmungen relativ gute Wärmeleiter darstellen.

⁵da die Eingangsleistung nur leicht schwankte und die Messung durch die Diode ein gewisses Rauschen enthält, ist es hier nicht sinnvoll zu versuchen, die Änderung der Eingangsleistung herauszurechnen.

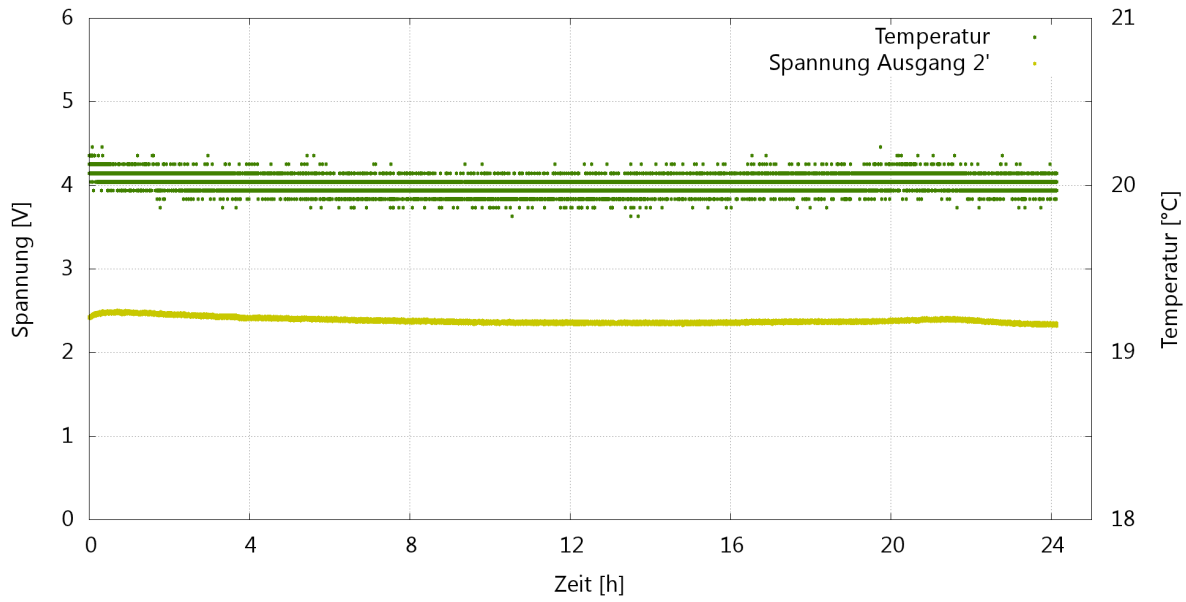


Abbildung 3.6: Temperatur- und Spannungsverlauf über ca. einen Tag. Eine detaillierte Version ist im Anhang zu finden.

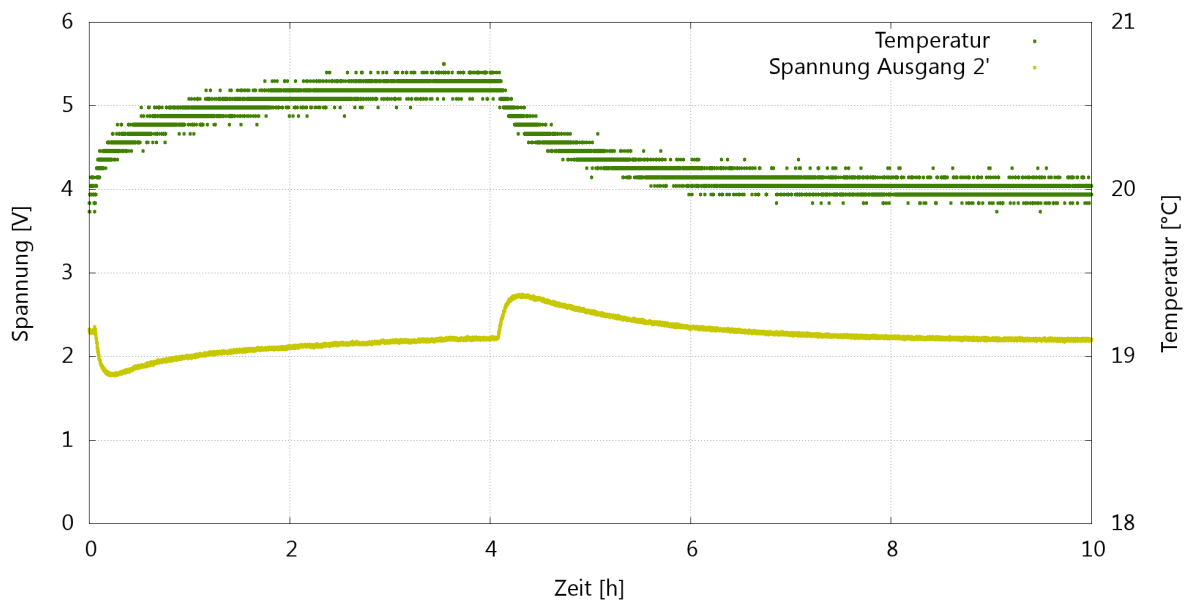


Abbildung 3.7: Temperaturabhängigkeit des Interferometers

Kapitel 4

Experiment

Nachdem mit Visibility und Stabilität die Qualität des Interferometers bestimmt worden ist, soll noch überprüft werden, ob der im Interferometer erzeugte Zustand mit den Erwartungen nach der Theorie übereinstimmt. Dazu wurden mit sieben Polarisationsrichtungen und drei Stellungen des Wellenplättchens 21 Messungen durchgeführt. Deren Ergebnisse werden mit den Werten nach Tabelle 2.1 verglichen.

4.1 Durchführung

Es wurde die Leistung der horizontalen und vertikalen Komponente am Ausgang 1' gemessen. Dazu wurden zwei Photodioden in den Ausgängen des PBS aufgebaut. Mit dem Schrittmotor wurde ein fixes Intervall des Phasenunterschieds Φ etwas größer als 2π abgefahren und die Spannung an den beiden Dioden aufgezeichnet. Die Schrittgröße war dabei so gewählt, dass ungefähr 16 Messpunkt im 2π -Intervall lagen. Es wurden Eingangspolarisationen von 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° und 90° verwendet. Das Wellenplättchen stand dabei auf 0° , 30° und 45° . Nach jeder Änderung der Eingangspolarisation wurde die Eingangsleistung gemessen und der Polarisationsregler so eingestellt, dass diese so hoch wie möglich war. Da jede Messung nur wenige Minuten dauerte, wurde lediglich das Tuch als Abdeckung zur Erhöhung der Kurzzeitstabilität verwendet. Es konnten leichte Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Messungen beobachtet werden, da sich die Temperatur von Messung zu Messung leicht änderte.

4.2 Auswertung

Nach den Gleichungen 2.4 sind die Leistungsverläufe der beiden Polarisationskomponenten der Form $b + a \cos \Phi(\alpha)$. Es bietet sich daher an, Amplitude a und Offset b der Messreihen zu ermitteln mit den Werten auf Tabelle 2.1 zu vergleichen. Die Berechnung von a und b erfolgt durch Anpassen der Funktion $b + a \cos \Phi(\alpha)$ an die Messwerte. Es wird wieder von einem quadratischen Zusammenhang zwischen Motorstellung und Phase ausgegangen. Aufgrund der kleinen Temperaturschwankungen und der damit einhergehenden Änderungen

des Phasenunterschieds gibt es einen zusätzlichen Fitparameter für die Phasenverschiebung. Für die erste Messung ist dieser auf 0 gesetzt, das heißt, dass das Maximum von V (nach Fit) exakt bei $\Phi = 0$ liegt. Für die Auswertung sind einige Einstellungen besonders interessant:

- (a) **Leistung gleich Null.** In den Einstellungen 1 und 7 sollte jeweils die Leistung einer Komponente konstant gleich 0 sein. Der Grund hierfür liegt lediglich darin, dass V - oder H -polarisiertes Licht eingestrahlt wird und mit dem Wellenplättchen auf 0° keine Polarisationsdrehung zu erwarten ist. Ungenauigkeiten bei der Einstellung von Polarisator und Wellenplättchen sowie Polarisationsdrehungen in den Komponenten führen zu Abweichungen von so einem Verlauf. Die gemessenen Werte weisen auf Fehleinstellungen bzw. Polarisationsdrehungen im Bereich von 1° - 2° hin.
- (b) **Leistung konstant größer Null.** Dies ist z.B. in den Messungen 8, 12 und 14 der Fall. In diesen Einstellungen wird durch das Wellenplättchen eine Polarisationskomponente komplett erzeugt bzw. vernichtet, sodass es in dieser Komponente keine Interferenz geben kann. Ein Vergleich der experimentell bestimmten Werte mit den Erwartungen liefert eine Abschätzung für die Verluste im Interferometer. Die Verluste liegen bei ca. 10-20%, was konsistent mit den Ergebnissen aus Abschnitt 3.3 ist.
- (c) **Leistung der horizontalen und vertikalen Komponente gleich.** Dies tritt bei den Einstellungen 15 bis 21 auf, da die schnelle Achse des Wellenplättchens genau diagonal zwischen V und H steht. Die Verhältnisse der Koeffizienten für die beiden Polarisationskomponenten erlauben den Vergleich mit der Theorie unabhängig von den Verlusten des Interferometers. Sie sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Die meisten Verhältnisse liegen sehr nahe am erwarteten Wert von 1. Das Verhältnis von den Amplituden a bei Messung 21 weicht etwas deutlicher aufgrund der verschwindenden Amplituden davon ab. Die Verhältnisse der Offsets b sinken gegen Ende der Messungen etwas ab.

Drei Messungen der Fälle (a), (b) und (c) sind in den Abbildungen 4.1 bis 4.3 zu sehen. Graphen zu den restlichen Messungen befinden sich im Anhang. In den Tabellen 4.1 und 4.2 sind die Ergebnisse aller 21 Messungen zusammengefasst. Die Unsicherheit wurde über das Rauschen der verwendeten Diode und die Unsicherheit des jeweiligen Fitparameters abgeschätzt. Für kleine Werte von a oder b liegt die Unsicherheit zum größten Teil im Rauschen, bei großen Werten im Fit.

Bei den meisten Messungen liegen die experimentellen Werte von a und b 10-20% unter den theoretischen Werten. Da auf die Eingangsleistung normiert wurde, ist dies auf die relativ hohen Verluste im Interferometer zurückzuführen. Ausnahmen sind Messungen, bei denen die theoretischen Werte sehr niedrig sind. Hier sind die Werte (vom Betrag her) teils auch größer als die Erwartungen, was vermutlich an den Einstellungsfehlern von Polarisator und Wellenplättchen liegt. Der relative Verlauf der Koeffizienten a und b stimmt gut mit den Erwartungen überein. Zur Visualisierung wurden die relativen Leistungen der

Nr.	β	γ	Offset b			Amplitude a		
			Theorie	Messung	Unsicherheit	Theorie	Messung	Unsicherheit
1	0°	0°	+0.5	+0.4333	0.0047	+0.5	+0.3890	0.0062
2	15°		+0.4665	+0.4029	0.0046	+0.4665	+0.3627	0.0061
3	30°		+0.375	+0.3288	0.0036	+0.375	+0.2940	0.0047
4	45°		+0.25	+0.2241	0.0024	+0.25	+0.1990	0.0032
5	60°		+0.125	+0.1184	0.0014	+0.125	+0.1031	0.0019
6	75°		+0.0335	+0.0438	0.0009	+0.0335	+0.0315	0.0019
7	90°		0	+0.0023	0.0008	0	-0.0024	0.0013
8	0°	30°	+0.3125	+0.2747	0.0025	+0.25	+0.1949	0.0033
9	15°		+0.3583	+0.3158	0.0046	+0.3415	+0.2736	0.0063
10	30°		+0.37	+0.3260	0.0035	+0.375	+0.2918	0.0046
11	45°		+0.3583	+0.3216	0.0033	+0.3415	+0.2893	0.0044
12	60°		+0.3125	+0.2625	0.0024	+0.25	+0.1999	0.0032
13	75°		+0.25	+0.2018	0.0017	+0.125	+0.1023	0.0023
14	90°		+0.1875	+0.1469	0.0014	0	+0.0073	0.0023
15	0°	45°	+0.25	+0.2209	0.0009	0	-0.0093	0.0012
16	15°		+0.25	+0.2233	0.0018	+0.125	+0.0949	0.0024
17	30°		+0.25	+0.2197	0.0031	+0.2165	+0.1672	0.0041
18	45°		+0.25	+0.2156	0.0029	+0.25	+0.1945	0.0040
19	60°		+0.25	+0.2060	0.0028	+0.2165	+0.1685	0.0038
20	75°		+0.25	+0.2009	0.0020	+0.125	+0.1038	0.0026
21	90°		+0.25	+0.1971	0.0018	0	+0.0095	0.0024

Tabelle 4.1: Ergebnisse und Erwartungen der vertikalen Komponente

21 Einstellungen bei $\Phi = 0$ (V) und $\Phi = 1$ (H) nach Theorie und Fitparametern geplottet (Abbildung 4.4). Man kann gut den ähnlichen Verlauf bei geringeren relativen Leistungen erkennen.

Nr.	β	γ	Offset b			Amplitude a		
			Theorie	Messung	Unsicherheit	Theorie	Messung	Unsicherheit
1	0°	0°	0	+0.0094	0.0025	0	+0.0094	0.0035
2	15°		+0.0335	+0.0357	0.0025	-0.0335	-0.0163	0.0035
3	30°		+0.125	+0.1061	0.0027	-0.125	-0.0860	0.0038
4	45°		+0.25	+0.2054	0.0035	-0.25	-0.1828	0.0049
5	60°		+0.375	+0.3071	0.0047	-0.375	-0.2832	0.0064
6	75°		+0.4665	+0.3831	0.0054	-0.4665	-0.3567	0.0072
7	90°		+0.5	+0.4124	0.0058	-0.5	-0.3847	0.0078
8	0°	30°	+0.1875	+0.1661	0.0025	0	-0.0049	0.0035
9	15°		+0.1417	+0.1262	0.0026	+0.0915	+0.0789	0.0036
10	30°		+0.125	+0.1150	0.0028	+0.125	+0.1034	0.0040
11	45°		+0.1417	+0.1166	0.0029	+0.0915	+0.1026	0.0038
12	60°		+0.1875	+0.1649	0.0029	0	-0.0403	0.0038
13	75°		+0.25	+0.2114	0.0027	-0.125	-0.0999	0.0036
14	90°		+0.3125	+0.2617	0.0035	-0.25	-0.1932	0.0042
15	0°	45°	+0.25	+0.2202	0.0025	0	-0.0095	0.0035
16	15°		+0.25	+0.2218	0.0026	+0.125	+0.0923	0.0035
17	30°		+0.25	+0.2207	0.0031	+0.2165	+0.1673	0.0039
18	45°		+0.25	+0.2200	0.0033	+0.25	+0.1961	0.0041
19	60°		+0.25	+0.2171	0.0030	+0.2165	+0.1673	0.0038
20	75°		+0.25	+0.2171	0.0027	+0.125	+0.1016	0.0038
21	90°		+0.25	+0.2157	0.0024	0	+0.0083	0.0034

Tabelle 4.2: Ergebnisse und Erwartungen der horizontalen Komponente

Messung	b_V/b_H	a_V/a_H
15	1.003	0.979
16	1.007	1.028
17	0.995	0.999
18	0.980	0.992
19	0.949	1.007
20	0.925	1.022
21	0.914	1.145

Tabelle 4.3: Verhältnisse der Koeffizienten der Messungen 15 bis 21

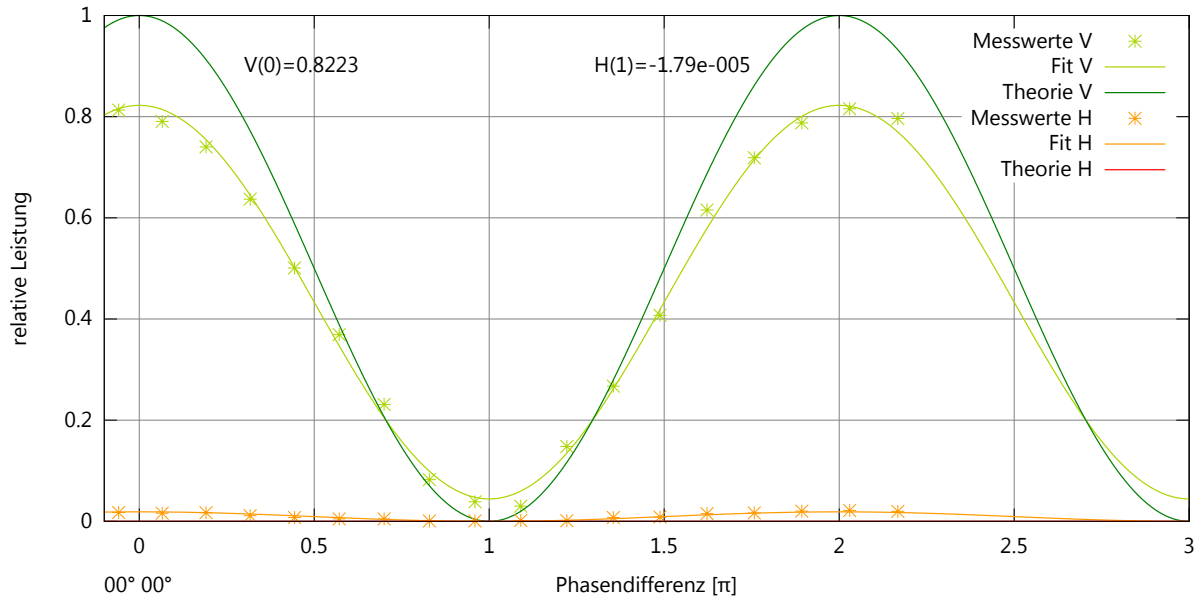


Abbildung 4.1: Messwerte, Fit und Theorie von Messung 1

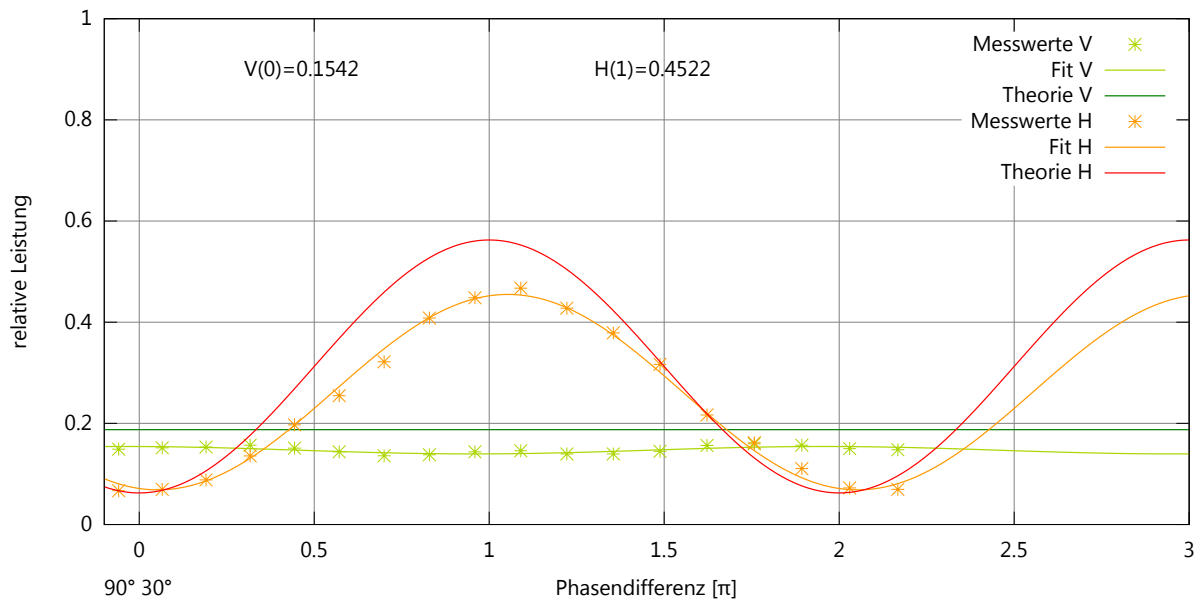


Abbildung 4.2: Messwerte, Fit und Theorie von Messung 14

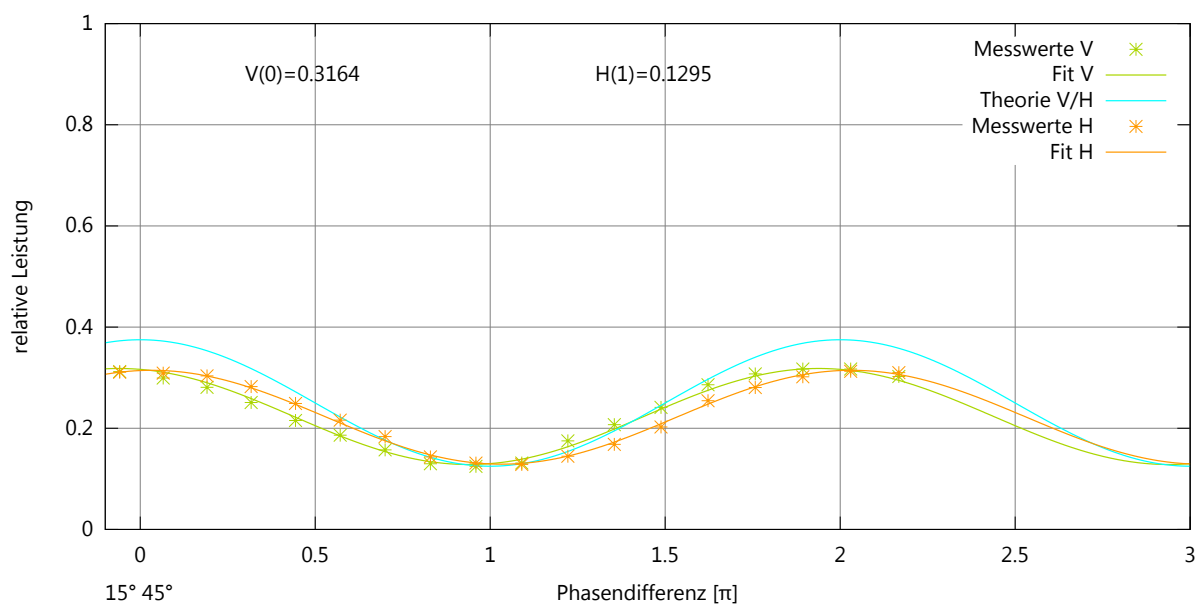
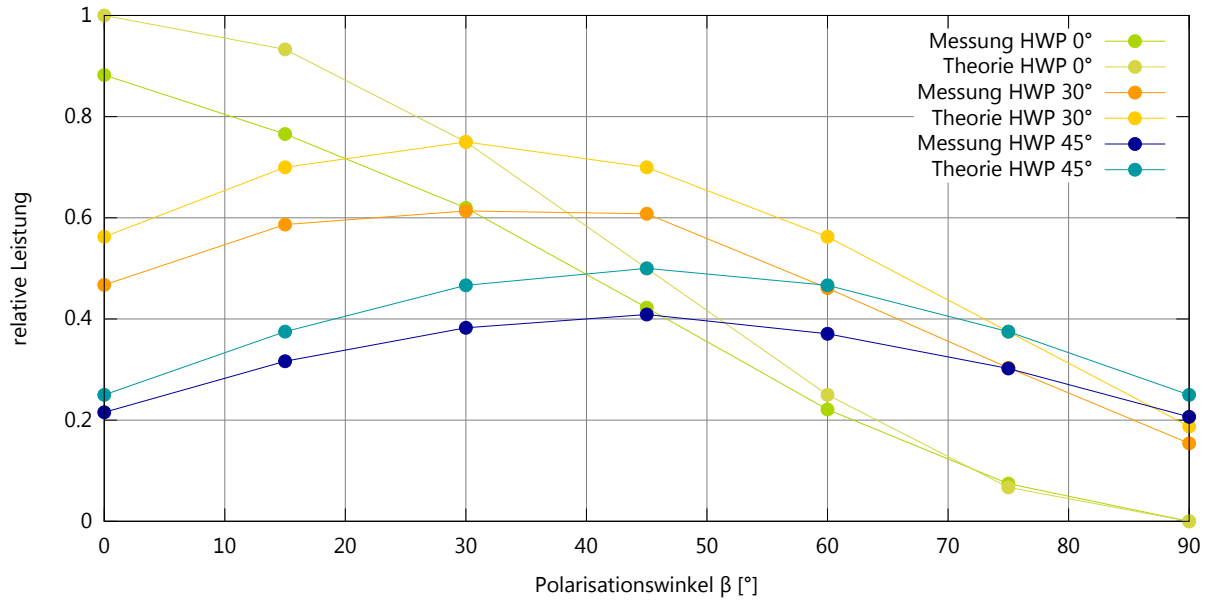
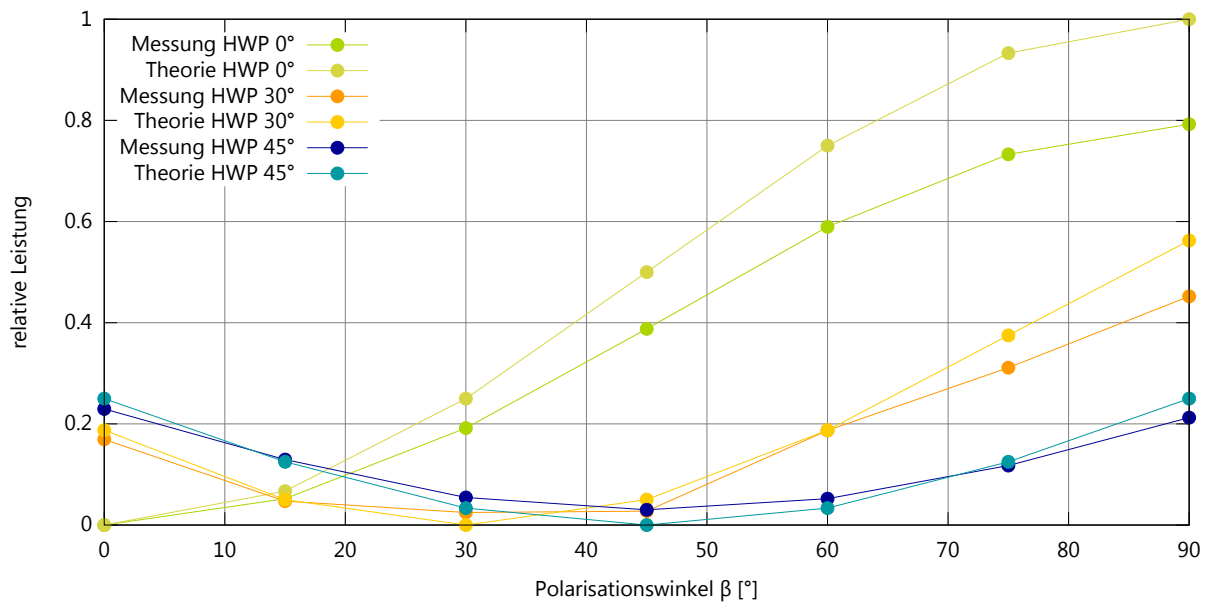


Abbildung 4.3: Messwerte, Fit und Theorie von Messung 16



(a) Vertikaler Anteil. $\Phi = 0$



(b) Horizontaler Anteil. $\Phi = \pi$

Abbildung 4.4: Vergleich der aus der Messung gewonnenen Werte mit den theoretischen

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Sagnac-Interferometer wurde aufgebaut und die Güte analysiert. Es verfügt mit einer Visibility um 96% und einer mittleren Phasenschwankung von 0.0157 rad über eine gute Qualität der Interferenz und Stabilität. Die Visibility kann möglicherweise durch Verwenden von Singlemode-Glasfasern an den Ausgängen verbessert werden. Die verwendeten Komponenten des Interferometers sind hierbei kein limitierender Faktor. Es konnte gezeigt werden, dass das Interferometer sehr empfindlich auf Temperaturänderungen reagiert. Eine besser geeignete, weniger provisorische thermische Isolation zum Beispiel aus Holz oder Styropor könnte die Stabilität weiter verbessern.

Die 21 erzeugten Zustände stimmen gut mit den in Kapitel 2.2 hergeleiteten Beziehungen überein. Es kam lediglich zu kleineren Phasenverschiebungen zwischen den Messungen, da sich durch das Öffnen der Abschirmung und die Arbeit am Versuchsaufbau die Temperatur zwischen den Messungen leicht änderte. Limitierend waren hier die Genauigkeit beim Einstellen von Polarisator und Wellenplättchen und die relativ hohen Verluste im Interferometer. Eine elektronische Ansteuerung von Wellenplättchen und Glasplättchen könnte einerseits die Präzision und Reproduzierbarkeit der Einstellung verbessern und andererseits die Phasenverschiebungen reduzieren. Die hohen Verluste von ungefähr 20% liegen hauptsächlich an den verwendeten Glasplättchen. Glasplättchen mit einer Antireflexbeschichtung sollten die Effizienz deutlich erhöhen können.

In Zukunft könnte der zweite Eingang des Interferometers aufgebaut und ein f_s -Laser verwendet werden. Dessen kurze Kohärenzlänge erfordert aber ein genau angepasstes zweites Glasplättchen. Bei gleichzeitiger Verwendung beider Eingänge ist ein genauer Abgleich der Weglängen der Eingänge nötig, d.h. der Abstand der Faserkoppler vom Strahlteiler und die Länge der Glasfasern müssen die gleiche optische Weglänge ergeben. Eine mögliche Anwendung hiervon ist die Fusion von Quantenzuständen.

Anhang A

Anhang

A.1 Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 3.4.2

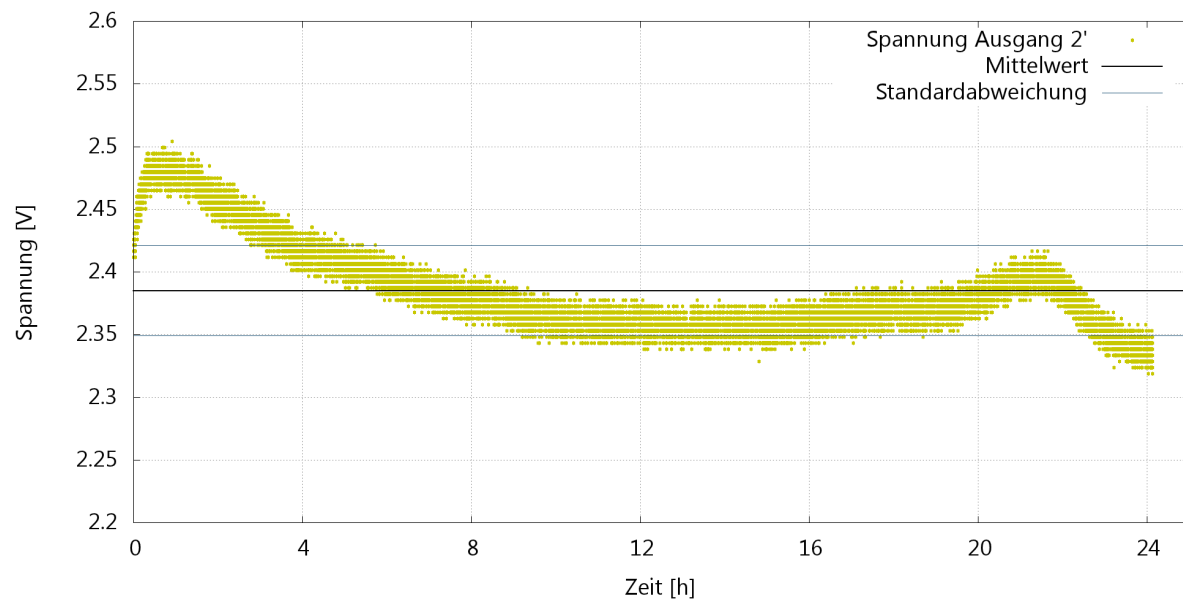
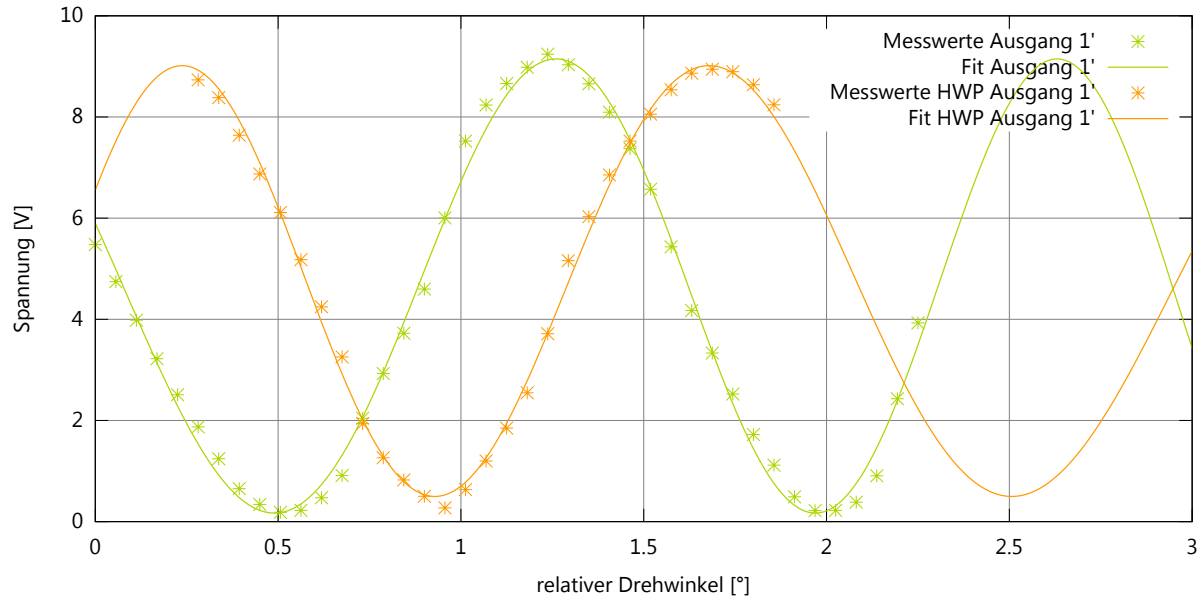
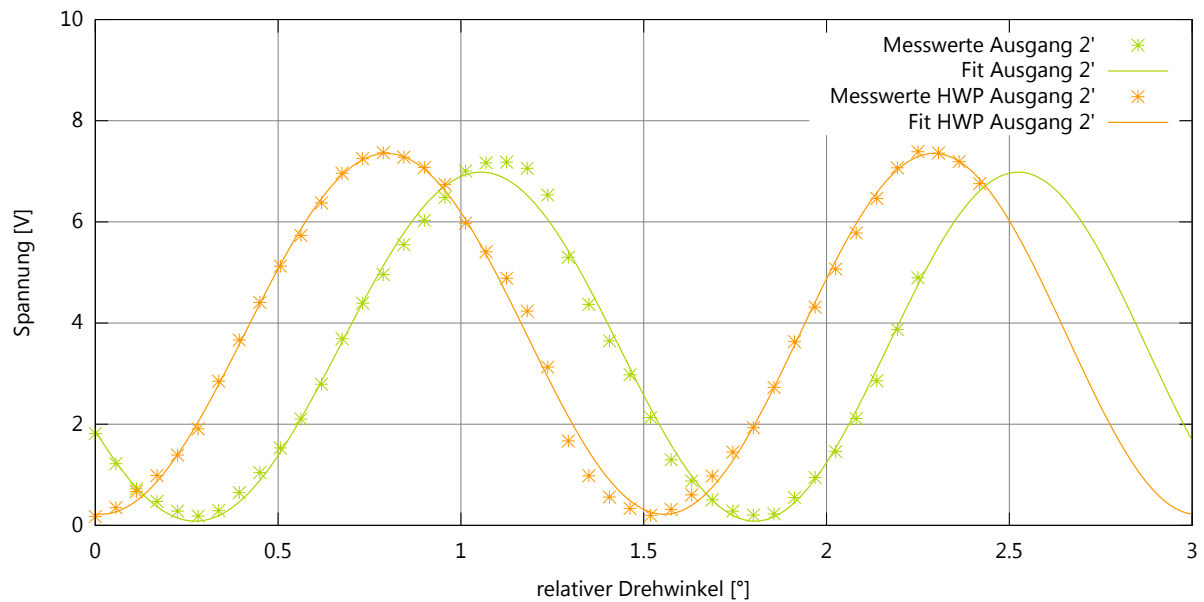


Abbildung A.1: Vergrößerte Version des Leistungsverlaufs bei der Stabilitätsmessung

A.2 Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 3.4.1



(a) Ausgang 1'



(b) Ausgang 2'

Abbildung A.2: Visibilitys der beiden Ausgänge in der Interferometereinstellung der 21 Messungen

A.3 Zusätzliche Abbildungen zu Abschnitt 4.2

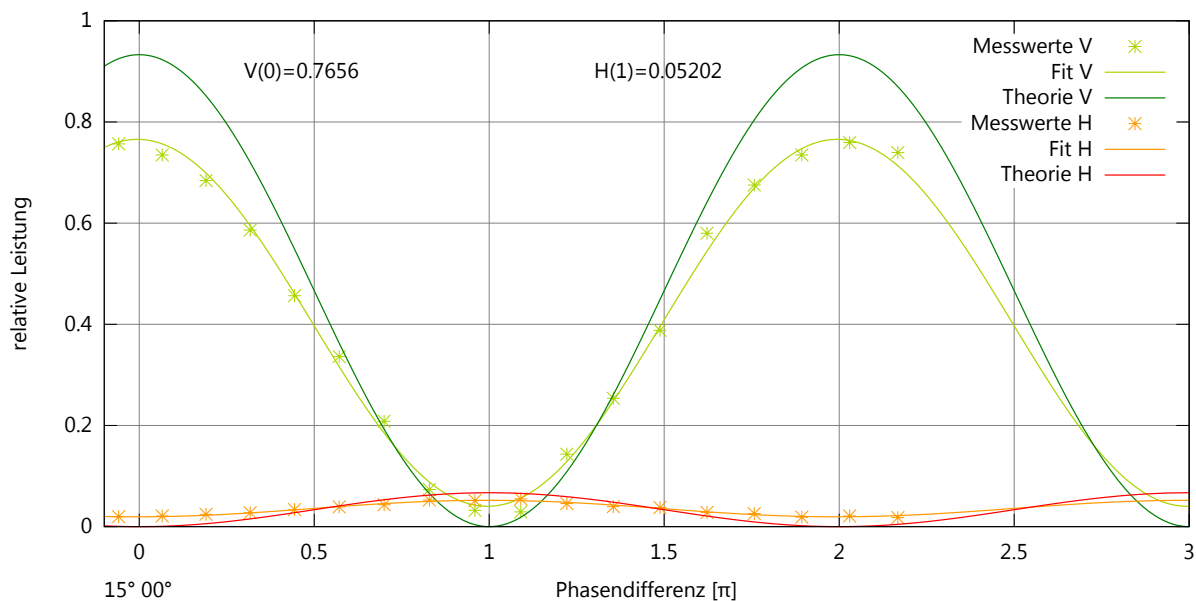


Abbildung A.3: Messung bei $15^\circ 00'$

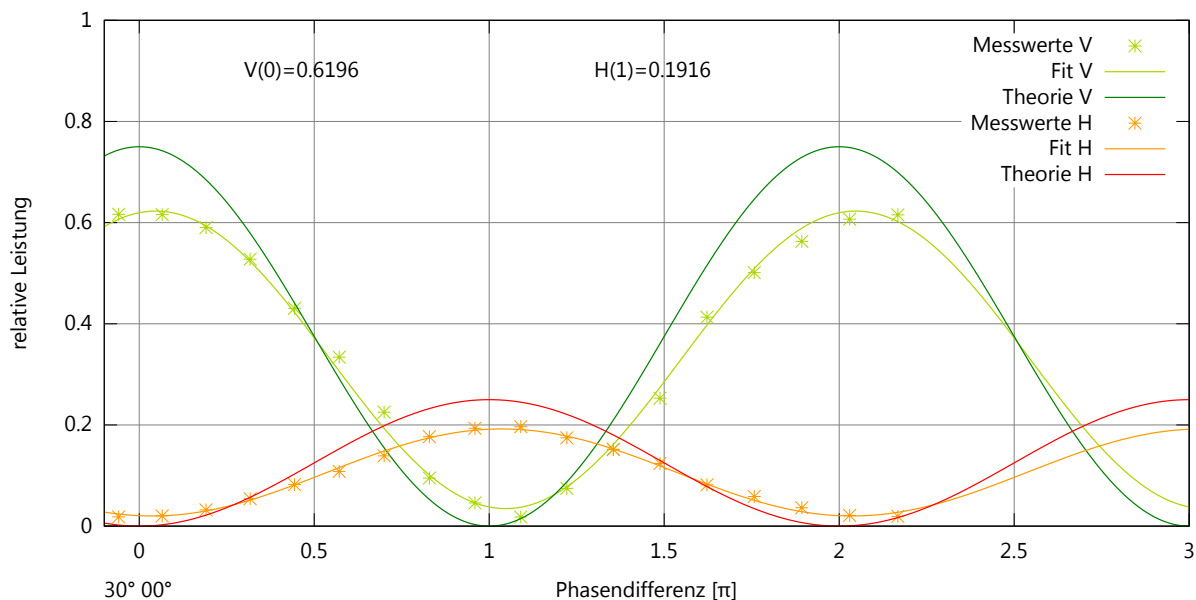
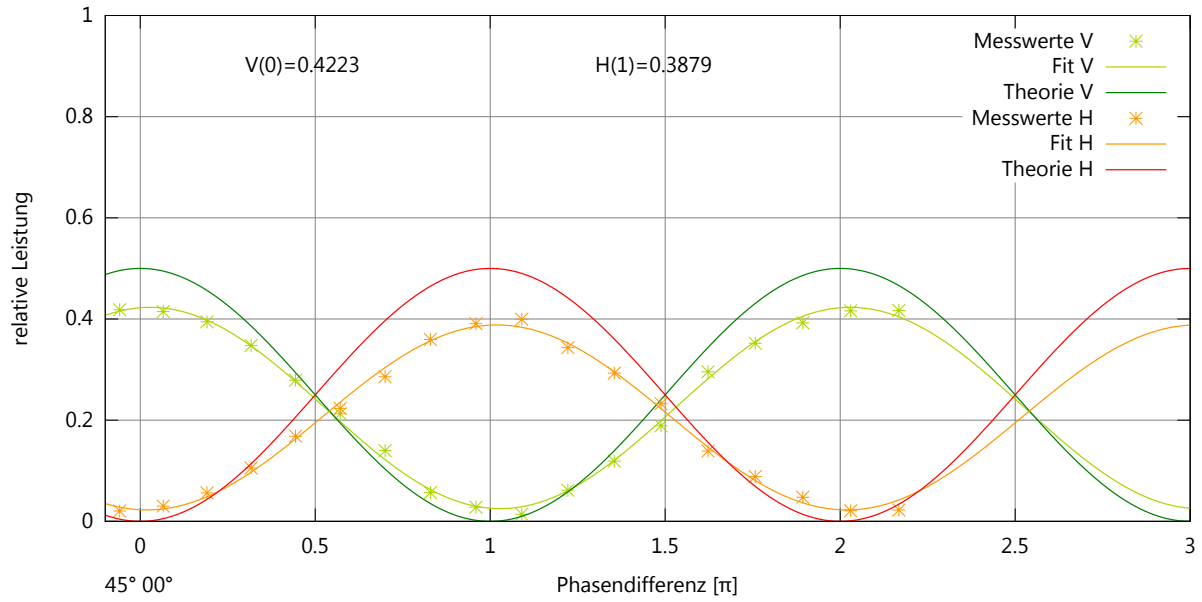
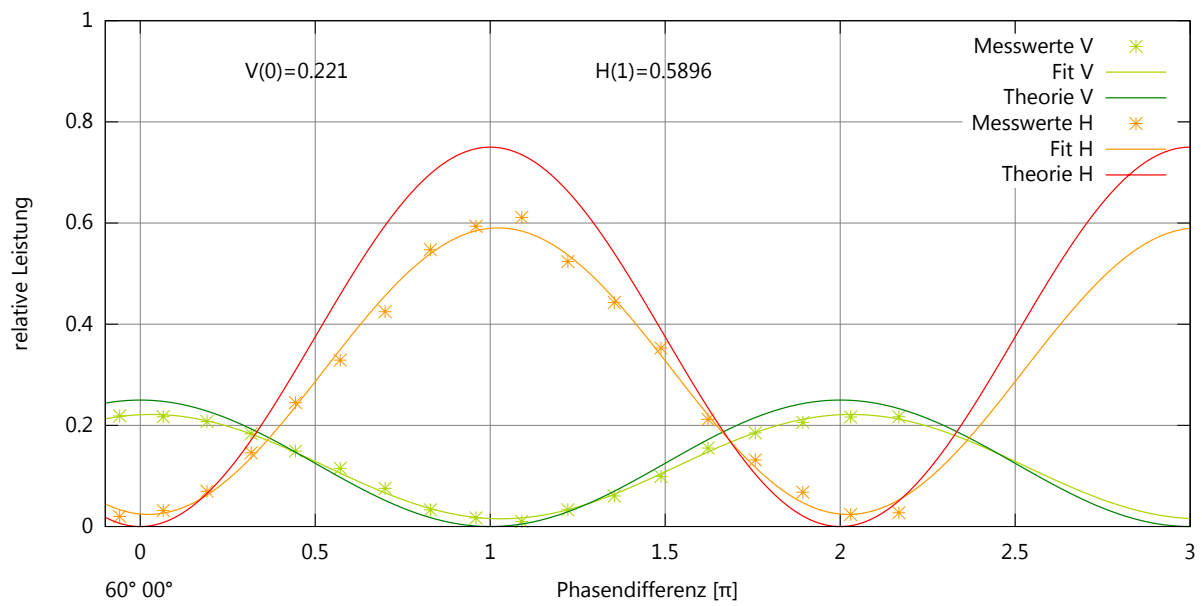


Abbildung A.4: Messung bei $30^\circ 00'$

Abbildung A.5: Messung bei $45^\circ 00'$ Abbildung A.6: Messung bei $60^\circ 00'$

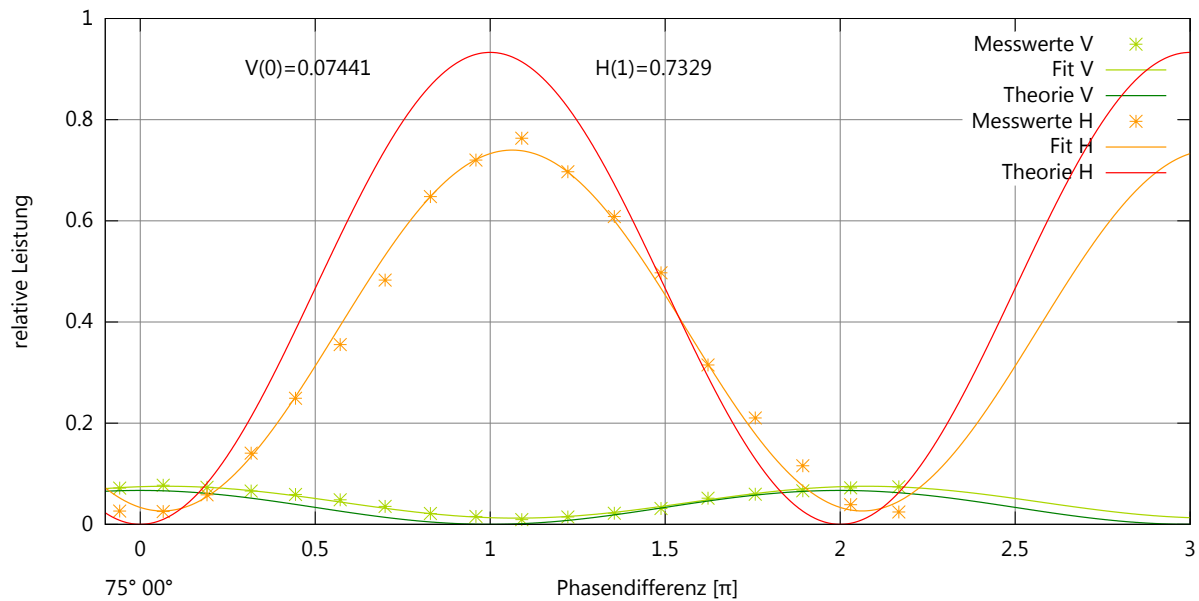


Abbildung A.7: Messung bei 75° 00°

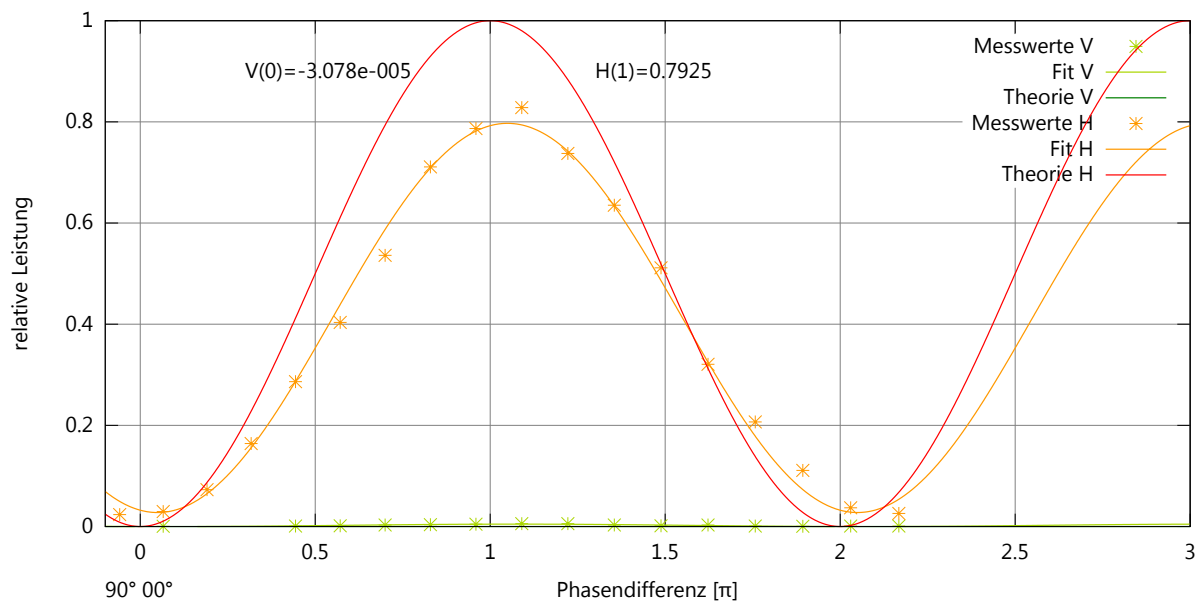
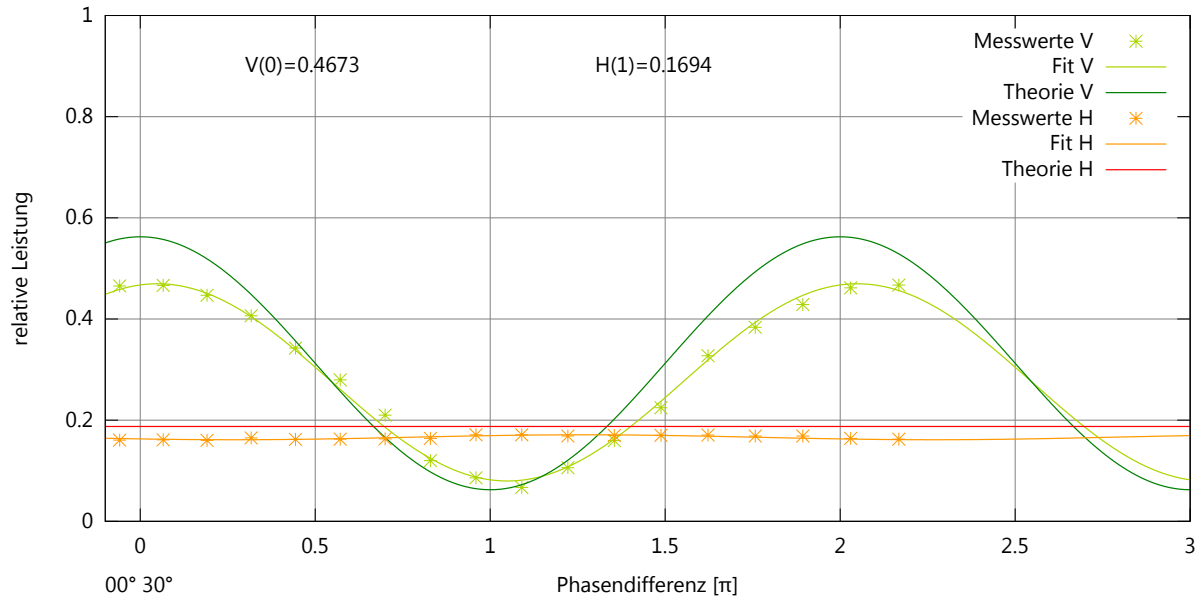
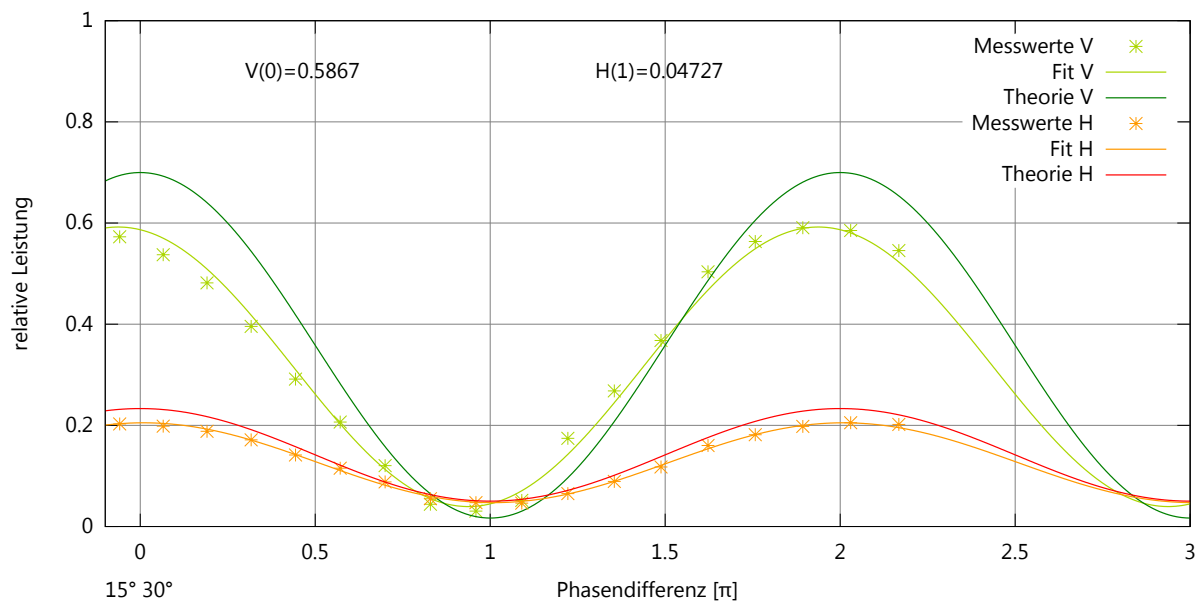


Abbildung A.8: Messung bei 90° 00°

Abbildung A.9: Messung bei $00^\circ 30'$ Abbildung A.10: Messung bei $15^\circ 30'$

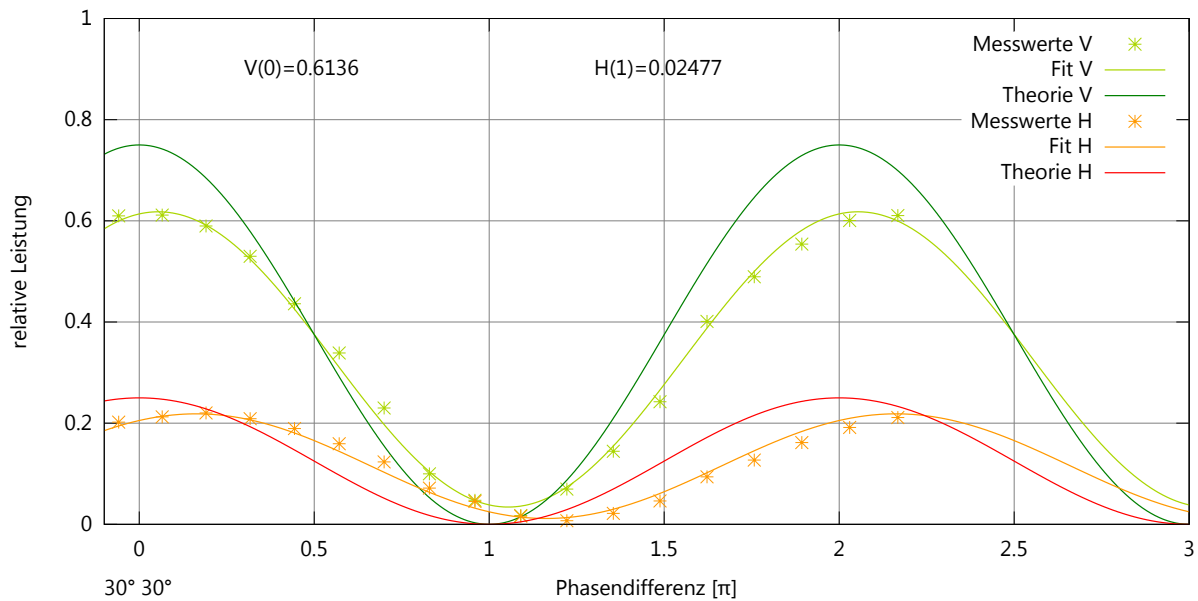


Abbildung A.11: Messung bei $30^\circ 30^\circ$

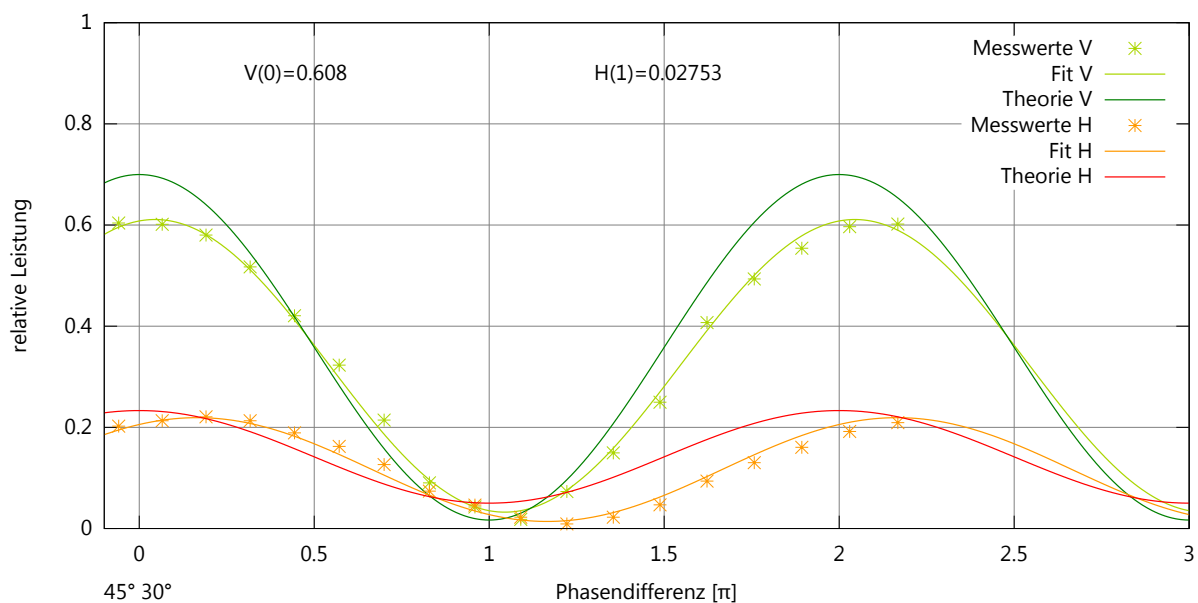


Abbildung A.12: Messung bei $45^\circ 30^\circ$

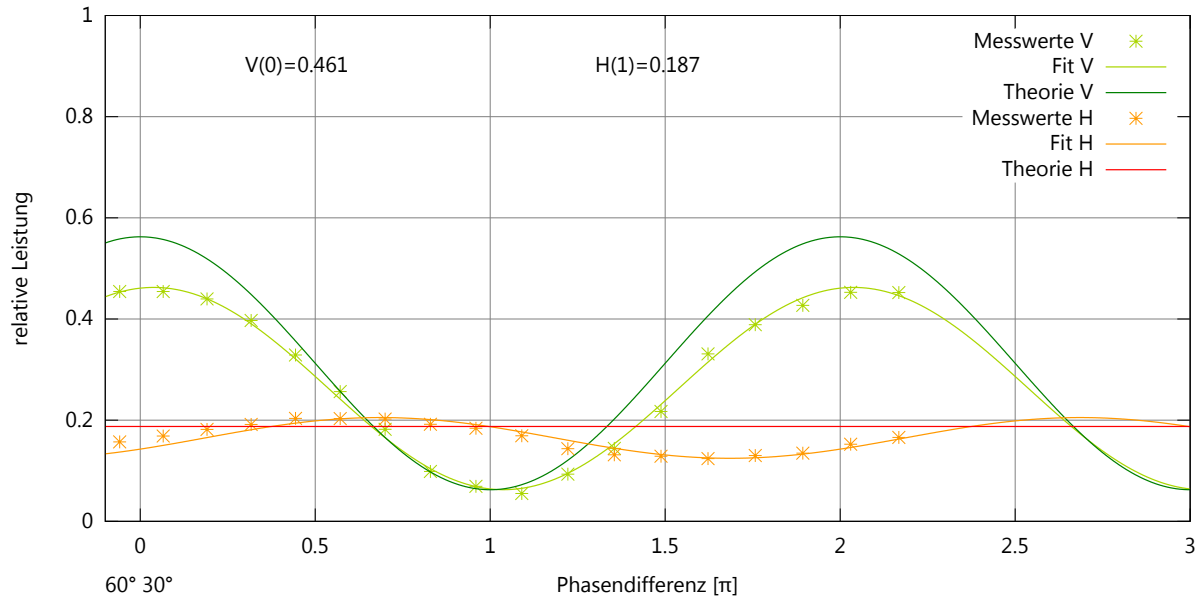


Abbildung A.13: Messung bei 60° 30°

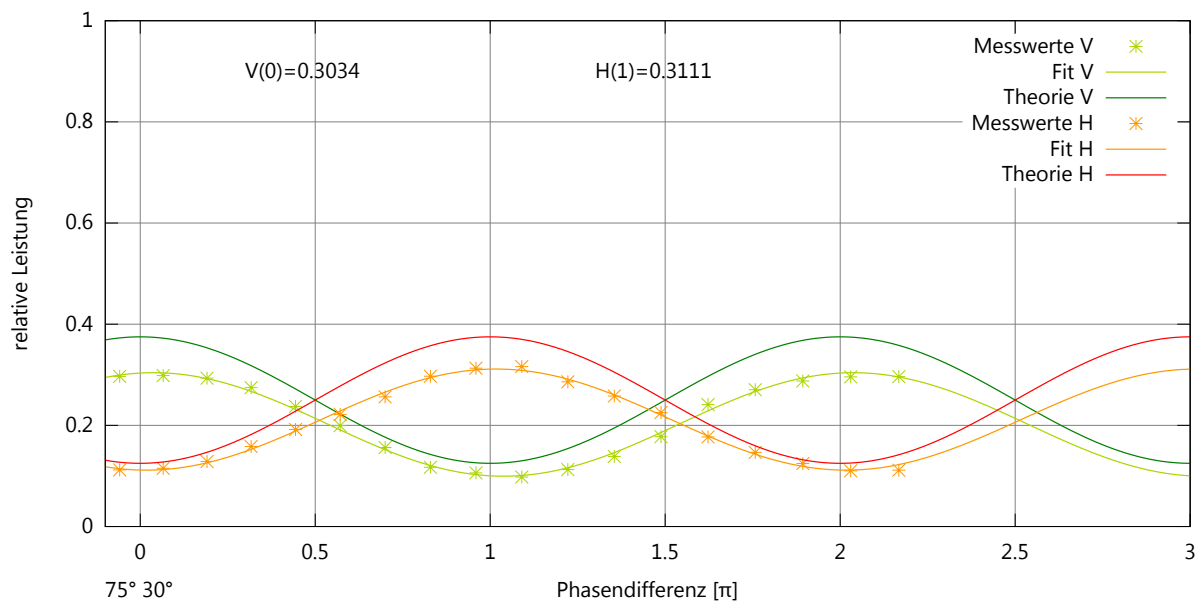


Abbildung A.14: Messung bei 75° 30°

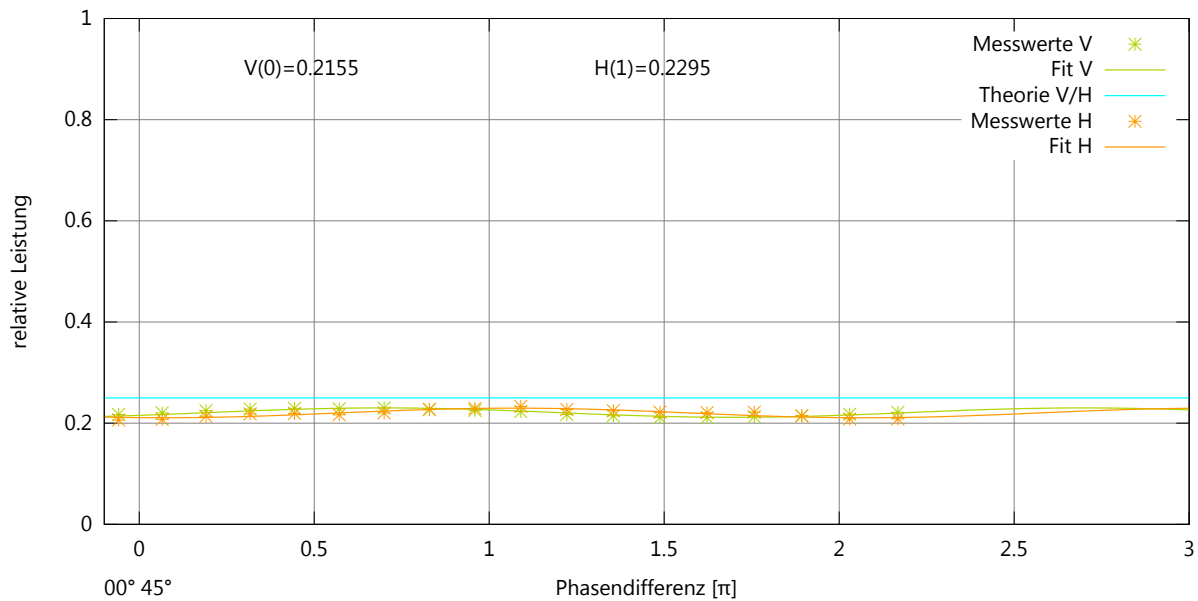


Abbildung A.15: Messung bei 00° 45°

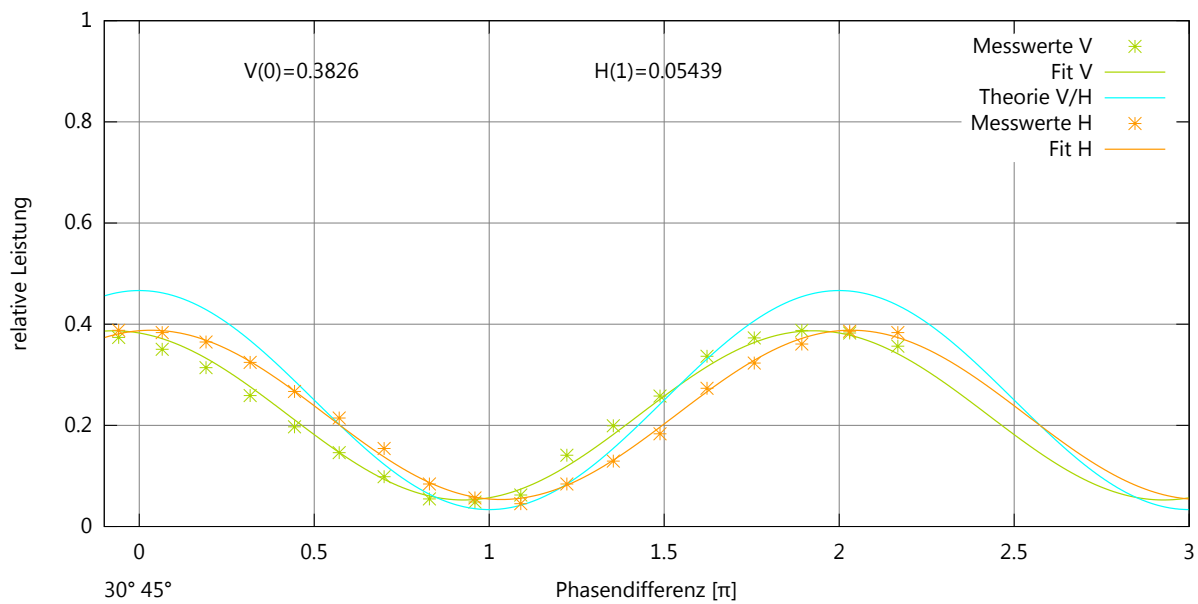


Abbildung A.16: Messung bei 30° 45°

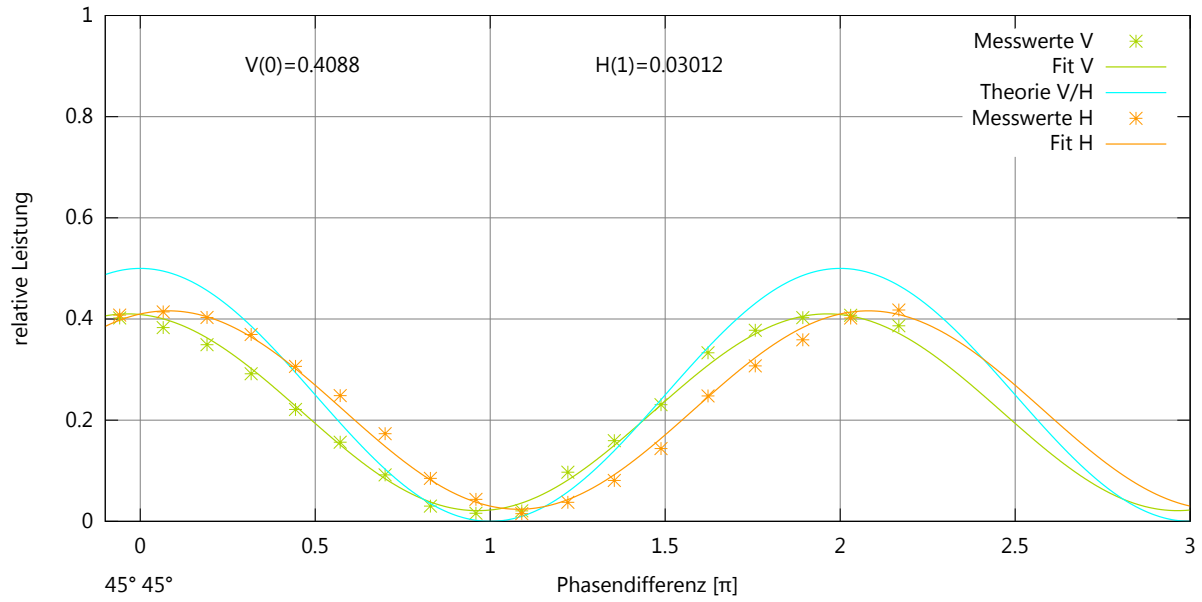


Abbildung A.17: Messung bei 45° 45°

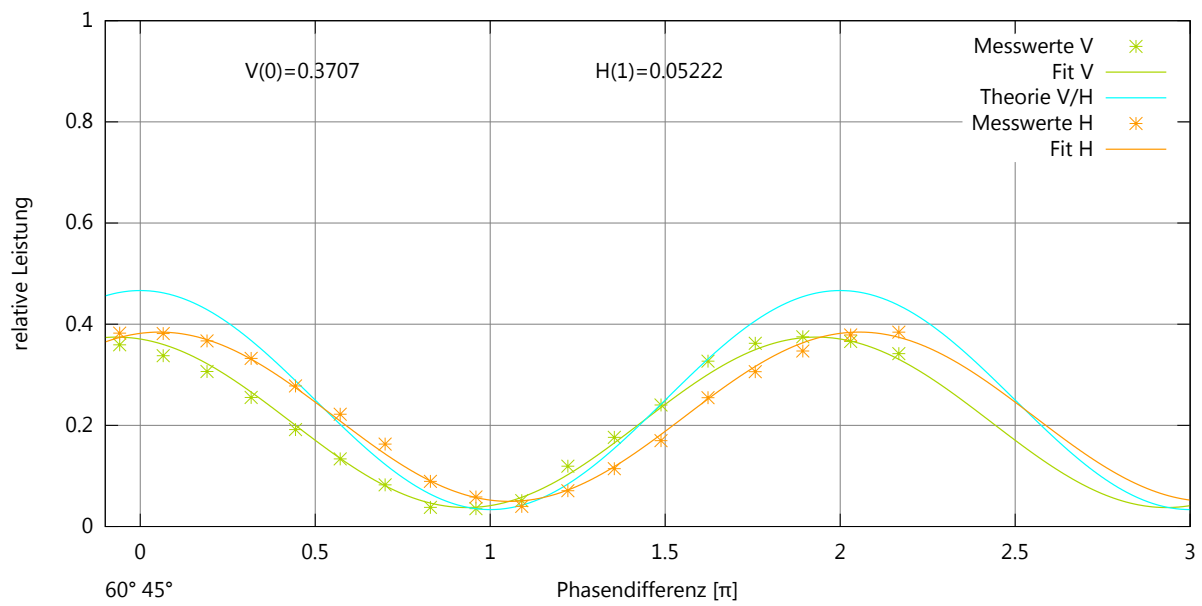


Abbildung A.18: Messung bei 60° 45°

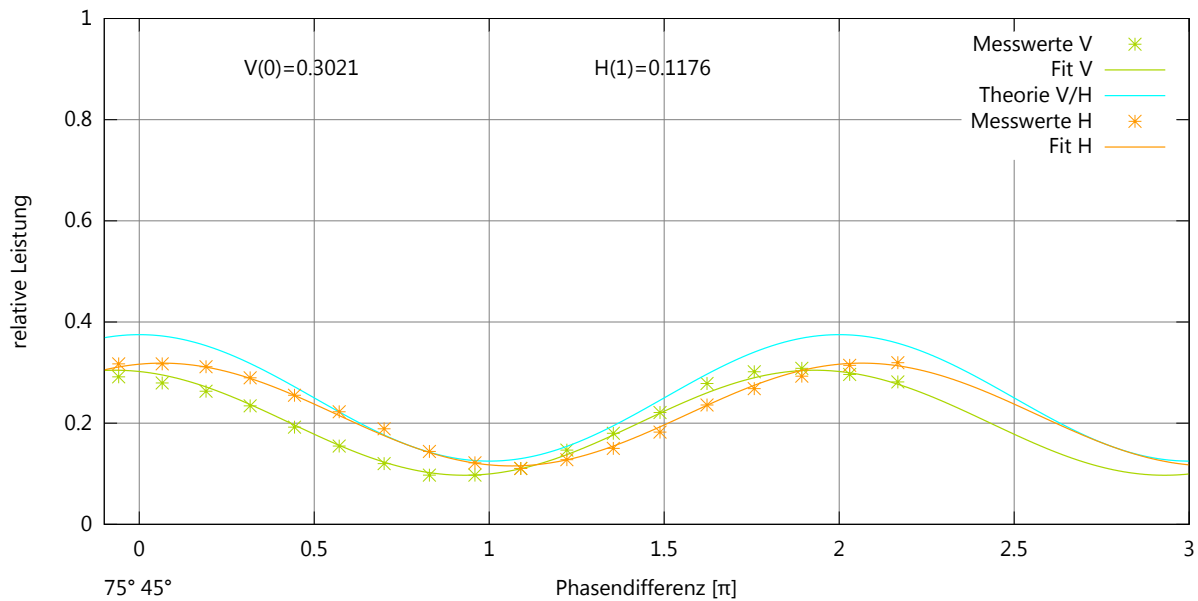


Abbildung A.19: Messung bei 75° 45°

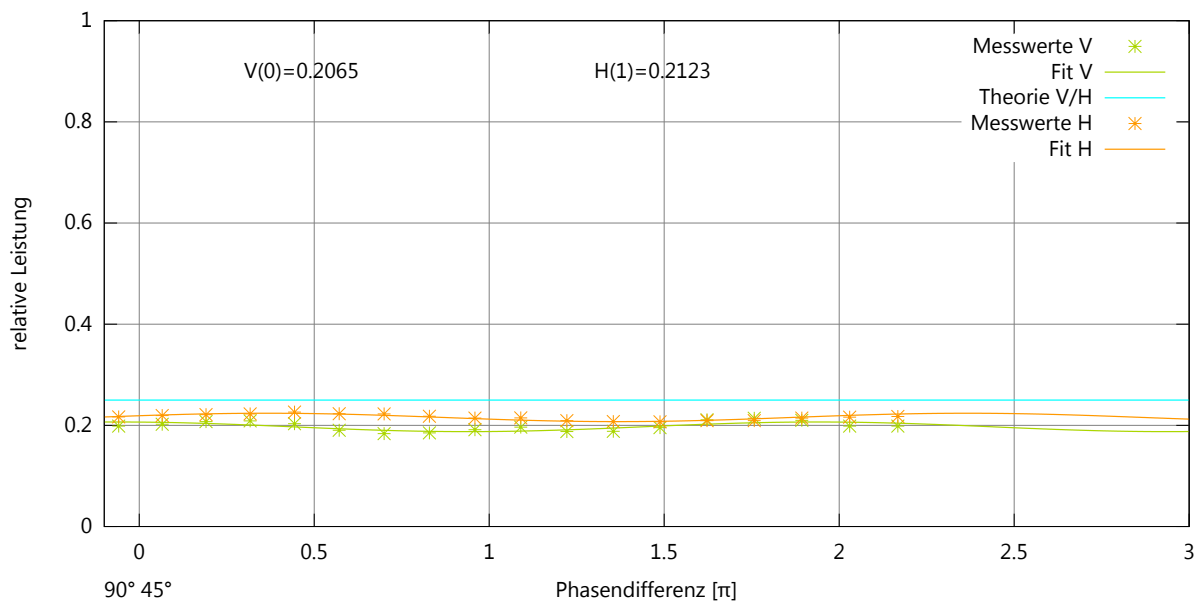


Abbildung A.20: Messung bei 90° 45°

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung eines Zustands auf der Blochkugel. Bild aus [9]	4
2.2	Schematischer Aufbau des Interferometers	6
2.3	Definition der Winkel	9
2.4	Skizze zum Strahlengang am Glasplättchen	10
2.5	Beispiel für den Verlauf der Leistung abhängig von der Stellung des Glasp- plättchens	11
3.1	Schematische Übersicht über den kompletten Versuchsaufbau	14
3.2	Benennung der Seiten des Strahlteilers. Der Pfeil kennzeichnet die Seite, von der Licht eingestrahlt wird.	18
3.3	Visibilitys der beiden Ausgänge. Spannung in Leistung umgerechnet. . . .	20
3.4	Die Gesamtleistung ist erhalten	21
3.5	Einfluss der Abdeckung auf die Stabilität. Links Messung ohne, rechts mit Tuch	23
3.6	Temperatur- und Spannungsverlauf über ca. einen Tag. Eine detaillierte Ver- sion ist im Anhang zu finden.	24
3.7	Temperaturabhängigkeit des Interferometers	24
4.1	Messwerte, Fit und Theorie von Messung 1	29
4.2	Messwerte, Fit und Theorie von Messung 14	29
4.3	Messwerte, Fit und Theorie von Messung 16	30
4.4	Vergleich der aus der Messung gewonnenen Werte mit den theoretischen . .	31
A.1	Vergrößerte Version des Leistungsverlaufs bei der Stabilitätsmessung	35
A.2	Visibilitys der beiden Ausgänge in der Interferometereinstellung der 21 Mes- sungen	36
A.3	Messung bei $15^\circ 00'$	37
A.4	Messung bei $30^\circ 00'$	37
A.5	Messung bei $45^\circ 00'$	38
A.6	Messung bei $60^\circ 00'$	38
A.7	Messung bei $75^\circ 00'$	39
A.8	Messung bei $90^\circ 00'$	39
A.9	Messung bei $00^\circ 30'$	40

A.10 Messung bei $15^\circ 30'$	40
A.11 Messung bei $30^\circ 30'$	41
A.12 Messung bei $45^\circ 30'$	41
A.13 Messung bei $60^\circ 30'$	42
A.14 Messung bei $75^\circ 30'$	42
A.15 Messung bei $00^\circ 45'$	43
A.16 Messung bei $30^\circ 45'$	43
A.17 Messung bei $45^\circ 45'$	44
A.18 Messung bei $60^\circ 45'$	44
A.19 Messung bei $75^\circ 45'$	45
A.20 Messung bei $90^\circ 45'$	45

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über die relativen Leistungen der 21 Einstellungen	8
3.1	Transmission und Reflexionen der Bauteile	17
3.2	Offset, Rauschen und Umrechnungsfaktoren der drei verwendeten Dioden .	17
3.3	Werte und Unsicherheiten der Visibility an den beiden Ausgängen	20
3.4	Visibilitys in der Interferometereinstellung der 21 Messungen	21
4.1	Ergebnisse und Erwartungen der vertikalen Komponente	27
4.2	Ergebnisse und Erwartungen der horizontalen Komponente	28
4.3	Verhältnisse der Koeffizienten der Messungen 15 bis 21	28

Literaturverzeichnis

- [1] C.H. Holbrow, E. Galvez, und M.E. Parks, *American Journal of Physics* **70** (2002), 260.
- [2] N. Kiesel. *Experiments on Multiphoton Entanglement* (2007). Doktorarbeit.
- [3] I. Krebs. *Erzeugung und Analyse von Hyperentanglement mit einem Michelson-Interferometer* (2010). Bachelorarbeit.
- [4] X. Ma, S. Zotter, N. Tetik, A. Qarry, T. Jennewein und A. Zeilinger, *Optics Express* **19** (2011), 22723.
- [5] M.A. Nielsen und I.L. Chuang: *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [6] T. Reimann. *Erzeugung von Zwei-Qubit-Hyperentanglement mit einem Sagnac-Interferometer* (2011). Bachelorarbeit.
- [7] B.E.A. Saleh und M.C. Teich: *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2007.
- [8] C.I.T. Schmid. *Multi-photon entanglement and applications in quantum information* (2008). Doktorarbeit.
- [9] P. Trojek. *Efficient Generation of Photonic Entanglement and Multiparty Quantum Communication* (2007). Doktorarbeit.
- [10] W. Wieczorek. *Multi-Photon Entanglement: Experimental Observation, Characterization, and Application of up to Six-Photon Entangled States* (2009). Doktorarbeit.
- [11] W. Zinth und U. Zinth: *Optik: Lichtstrahlen - Wellen - Photonen*. Oldenbourg Verlag, München, 2009.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Julian Schimek, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

München, 9.12.2011