
Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie

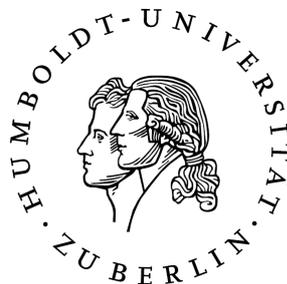
- Gehäuse, Phasenstabilisierung, Fasereinbau -

Masterarbeit
im Studiengang Elektrotechnik und
Informationstechnik
Vertiefungsrichtung Photonik

an der



in Kooperation mit der



vorgelegt von

Björnstjerne Zindler

geboren am 13. November 1966 in Görlitz

eingereicht am 21. November 2011

Erstgutachter: Herr Professor Dr. A. Richter
Zweitgutachter: Herr Professor Dr. O. Benson

Meiner Mutter gewidmet

*03. Juli 1940

+22. September 2010

Dämpfung einer Faser infolge Normalspannung Typ 1

- Vorbetrachtungen:

Ein Feststoff dehnt sich in der Regel bei Erwärmung aus. Die daraus resultierende Längenänderung „ ΔL “ ist berechenbar über:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

Die Normalspannung „ σ “ in einem Stoff ist definiert durch das Hookesche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dabei ist „ E “ das Elastizitätsmodul des Stoffes und „ ε “ die Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

⇒

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Für eine Glasfaser sind „ E “ und „ α “ gegeben:

$$E = 73 \cdot 10^9 \quad \alpha \approx 7 \cdot 10^{-6}$$

⇒

$$\sigma = 500 \cdot 10^3 \cdot \Delta T$$

Die theoretische Bruchspannung einer Faser kann mit 0,1 Gpa angenommen werden. Damit ist „ ΔT_{\max} “ ermittelt:

$$0,1 \cdot 10^9 = 500 \cdot 10^3 \cdot \Delta T$$

⇒

$$\Delta T_{\max} \approx 200[K]$$

Wobei zuerst die maximale Erwärmung laut Herstellerangaben maßgebend sein wird.

- Versuchsaufbau:

Ein dünnwandiges Aluminium- Rohr mit „ $d_0 = 10\text{mm}$ “ umwickelt mit einer Standard- Monomodefaser zugfest eingespannt und $N = 2$ Windungen:

$$L_0 = 2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}$$

⇒

$$L_0 = 62,83 \cdot 10^{-3} [m]$$

Die Längenänderung „ ΔL “ infolge Erwärmung des Rohres:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

⇒

$$\Delta L = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 62,83 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\Delta L[m] = 1,45 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

Wobei hier das „ $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}$ “ des Aluminiums eingesetzt werden muss. Die resultierende Dehnung ist berechenbar:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

⇒

$$\varepsilon = \frac{1,45 \cdot 10^{-6}}{62,83 \cdot 10^{-3}} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\varepsilon = 23 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

Die Spannung nun in der Faser:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

⇒

$$\sigma = 73 \cdot 10^9 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\sigma = 1,679 \cdot 10^6 \cdot \Delta T$$

Als letzten Wert das maximale „ ΔT “:

$$\sigma_{\max} = 1,679 \cdot 10^6 \cdot \Delta T$$

⇒

$$0,1 \cdot 10^9 = 1,679 \cdot 10^6 \cdot \Delta T$$

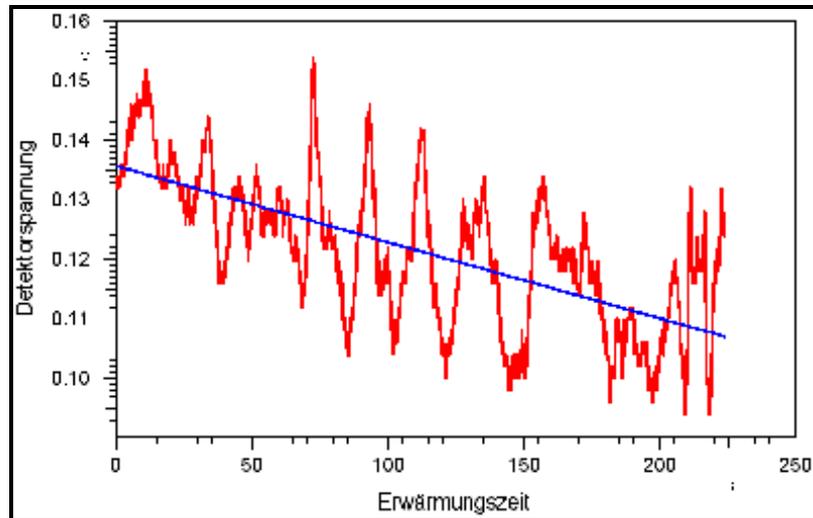
⇒

$$\Delta T_{\max} \approx 60[K]$$

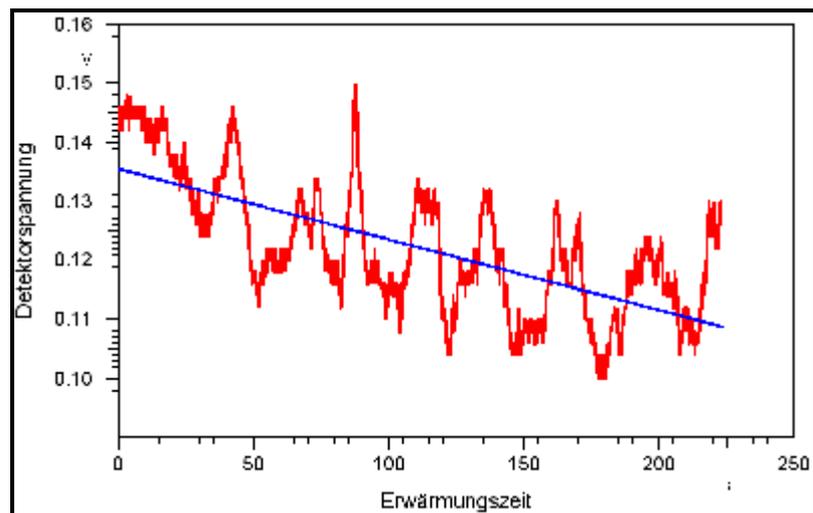
Der Normalspannungsaufbau ist, wie letztendlich erwartet, unabhängig von der Anzahl der Windungen und dem Durchmesser des Wickelrohres, jedoch bestimmt vom linearen Ausdehnungskoeffizienten des Rohres und dem Elastizitätsmodul der Faser.

- Messwerte:

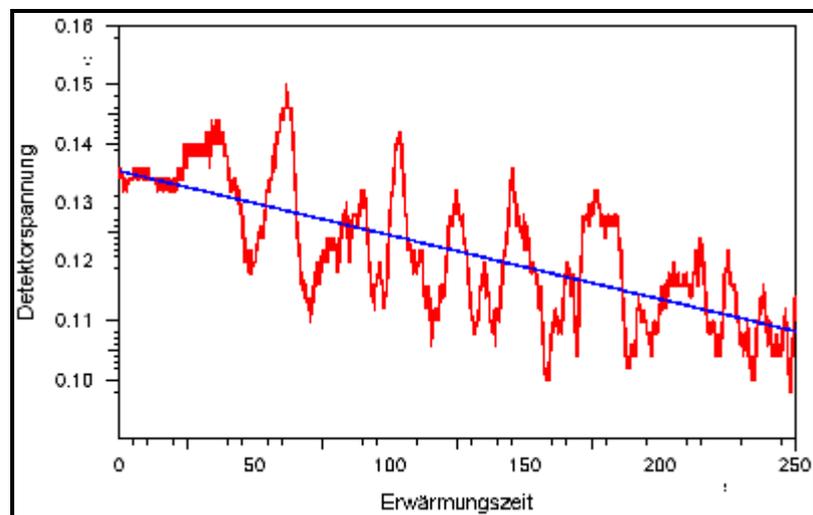
Es wurden drei Stressmessungen durchgeführt, bei dem das Rohr von etwa 20 auf 70°C erwärmt wurde. Die dazugehörigen Grafen mit linear regressierter Funktion:



Stressmessung 1 mit den Messwerten (rot) und der regressierten Resultierenden (blau).



Stressmessung 2 mit den Messwerten (rot) und der regressierten Resultierenden (blau).



Stressmessung 3 mit den Messwerten (rot) und der regressierten Resultierenden (blau).

- Auswertung:

Deutlich zu sehen sind große Sprünge in den Messgrafien gegenüber der resultierenden Funktion. Wahrscheinlich sind diese begründet mit dem Schlupf der Faser auf der Rohroberfläche, welche nicht gleichmäßig sondern in Sprüngen erfolgt. Die dadurch entstehenden Spannungsspitzen induzieren vorliegendes Messbild.

Die regressierten linearen Funktionen:

$$\text{Messung 1:} \quad 0,1357178 - 128,0 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

$$\text{Messung 2:} \quad 0,1356049 - 119,5 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

$$\text{Messung 3:} \quad 0,1357178 - 108,3 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

Die Resultierende daraus:

$$U = 0,136 - 118,6 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

Die Erwärmung erfolgte über ein Zeitraum von etwa 250 Sekunden um 50 Kelvin, so kann die Zeit „t“ durch die Temperatur „T“ substituiert werden.

$$U = 0,136 - 593 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

Grunddämpfung:

Eine Messung der Ausgangsleistung der Laserdiode direkt am Fotodetektor ergab ein Spannungsäquivalent von 5,040 V. Mit der Grundspannung von 0,136 V bei 20°C ergibt sich eine Dämpfung infolge Biegung der Faser:

$$U[db] = \frac{1}{N} \cdot 10 \cdot \lg \frac{U_a}{U_e}$$

⇒

$$U[db] = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot \lg \frac{0,136}{5,040}$$

⇒

$$U[db] = -7,84$$

Zum Vergleich, aus dem Versuch „Biegung einer Faser und die dabei auftretende Dämpfung Typ 1“ ist eine Dämpfung von -7,01 db bekannt.

Temperaturgradient:

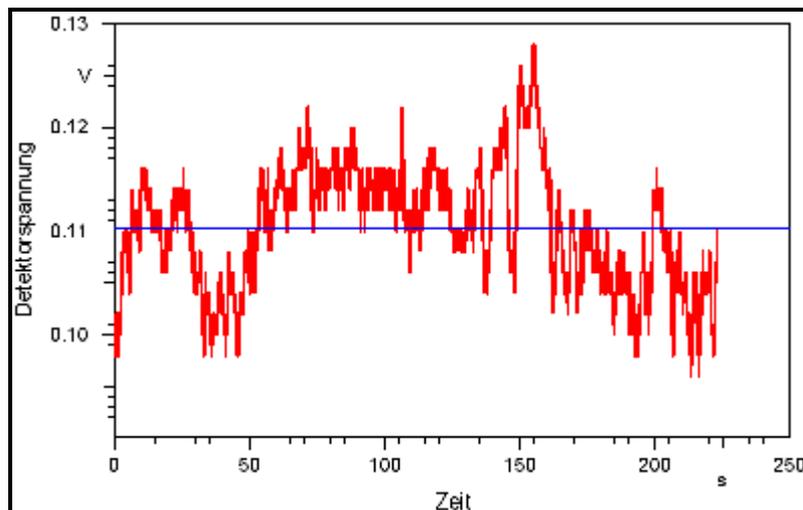
Der mittlere temperaturabhängige Gradient der Dämpfung infolge Normalspannung für ein Krümmungsradius von 10mm ist ablesbar mit:

$$\frac{dU}{dT} = -593 \cdot 10^{-6} \approx -600 \left[\frac{\mu V}{K} \right]$$

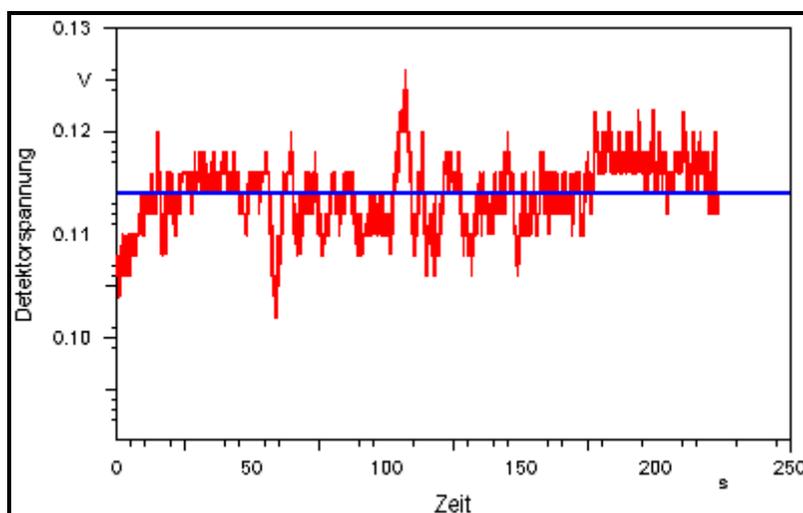
In B. Zintzen „Untersuchung zur thermischen Gestaltung von Leistungsfaserlasern.“ Fakultät für Maschinenwesen der TH Aachen, 19. November 2008 sind für einen ähnlichen Fall Werte von $-60\mu V/K$ angegeben.

- Messwerte:

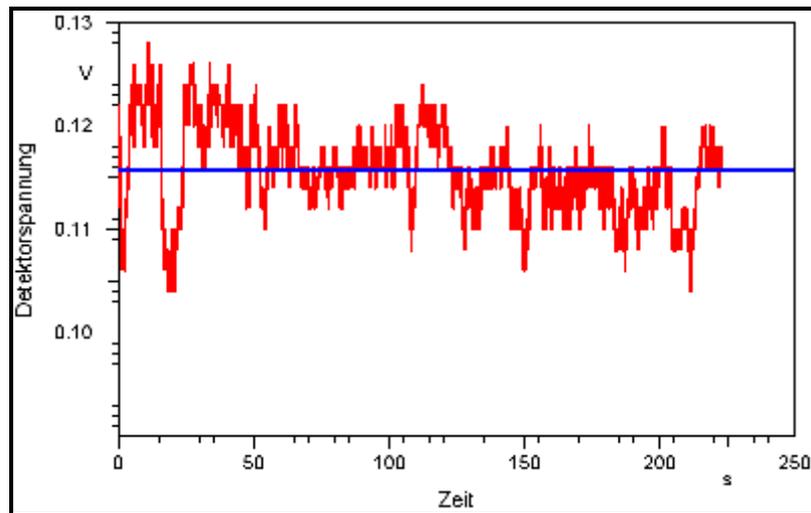
Es wurden drei Messungen durchgeführt, bei dem das Rohr konstant auf $70^\circ C$ gehalten wurde. Die dazugehörigen Grafen mit ermitteltem Mittelwert:



Messung 1 mit den Messwerten (rot) und dem errechneten Mittelwert (blau).



Messung 2 mit den Messwerten (rot) und dem errechneten Mittelwert (blau).



Messung 3 mit den Messwerten (**rot**) und dem errechneten Mittelwert (**blau**).

- Auswertung:

Bedingt durch den Mangel an einer ausreichenden konstanten Temperatur von 70°C kommt es auch hier zu Sprüngen in der detektierten optischen Leistung infolge Schlupf der Faser auf der rauhen Rohroberfläche.

Die errechneten Mittelwerte:

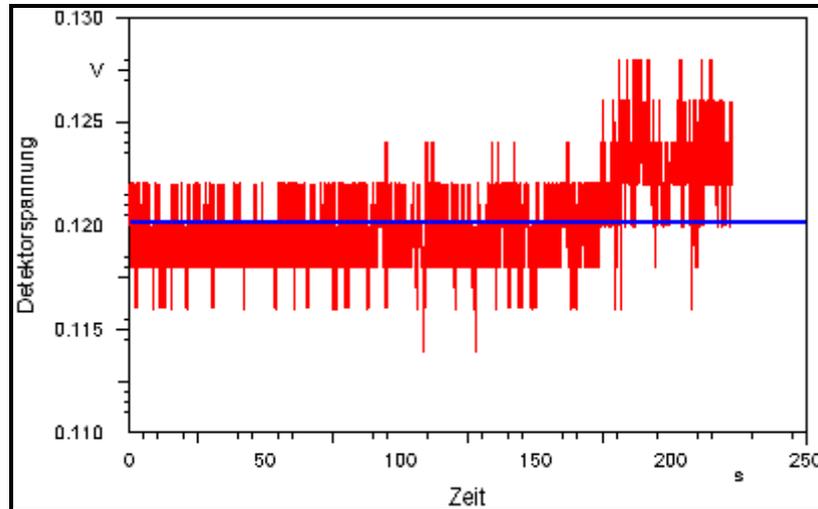
Messung 1:	0,110 314
Messung 2:	0,113 940
Messung 3:	0,115 766

Der Durchschnitt:

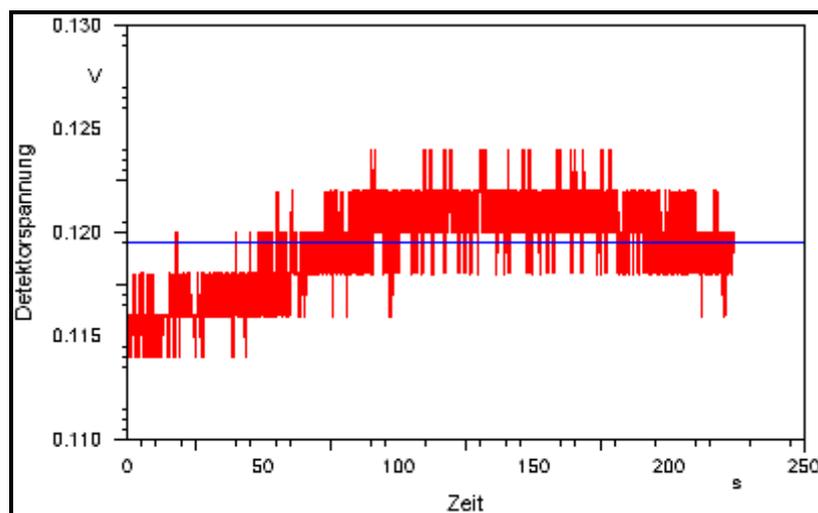
$$\bar{U}_{70^{\circ}\text{C}} = 0,113[\text{V}]$$

- Messwerte:

Es wurden zwei Messungen durchgeführt, bei dem das Rohr konstant auf 21°C gehalten wurde. Die dazugehörigen Grafen mit ermitteltem Mittelwert:



Messung 1 mit den Messwerten (rot) und dem errechneten Mittelwert (blau).



Messung 2 mit den Messwerten (rot) und dem errechneten Mittelwert (blau).

- Auswertung:

Die errechneten Mittelwerte:

Messung 1: 0,120317
 Messung 2: 0,119339

Der Durchschnitt:

$$\bar{U}_{21^{\circ}\text{C}} = 0,120[\text{V}]$$

Grunddämpfung:

Eine Messung der Ausgangsleistung der Laserdiode direkt am Fotodetektor ergab ein Spannungsäquivalent von 5,040 V. Mit der Grundspannung von 0,120 V bei 20°C ergibt sich eine Dämpfung infolge Biegung der Faser:

$$U[db] = \frac{1}{N} \cdot 10 \cdot \lg \frac{U_a}{U_e}$$

⇒

$$U[db] = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot \lg \frac{0,120}{5,040}$$

⇒

$$U[db] = -8,12$$

Zum Vergleich, aus dem Versuch „Biegung einer Faser und die dabei auftretende Dämpfung Typ 1“ ist eine Dämpfung von -7,01 db bekannt.

Temperaturgradient:

Es kann erneut der Temperaturgradient ermittelt werden:

$$\frac{dU}{dT} = \frac{\bar{U}_{70^\circ C} - \bar{U}_{21^\circ C}}{50K}$$

⇒

$$\frac{dU}{dT} = -140 \left[\frac{\mu V}{K} \right]$$

In B. Zintzen „Untersuchung zur thermischen Gestaltung von Leistungsfaserlasern.“ Fakultät für Maschinenwesen der TH Aachen, 19. November 2008 sind für einen ähnlichen Fall Werte von -60μV/K angegeben.

- Gesamtauswertung:

Je nach geplanten Anwendungsfall, ob die Einstellbarkeit der Faserdämpfung erwünscht oder nicht erwünscht ist, kann ein veränderbarer Krümmungsradius der Faser genutzt werden, um solch ein Regelglied zu realisieren.

Dabei kann die Grunddämpfung von der Windungsanzahl und dem Krümmungsradius „in Ruhe“ voreingestellt werden. Die Arbeitsgerade des Regelgliedes wird durch die Größe der Veränderbarkeit des Radiuses bestimmt. Im vorliegenden Fall gilt für Aluminium:

$$\Delta L = 1,45 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = 689,655 \cdot 10^3$$

Mit:

$$\frac{dU}{dT} = -140 \left[\frac{\mu V}{K} \right]$$

⇒

$$\frac{dU}{dL} = -96,55 \left[\frac{V}{m} \right]$$

⇒

$$\boxed{\frac{dU}{dL} \approx -100 \left[\frac{\mu V}{\mu m} \right]}$$

In der Dezibel- Domäne:

$$\frac{dU}{dT} [db] = \frac{1}{N} \cdot 10 \cdot \lg \frac{\bar{U}_{70^{\circ}C}}{\bar{U}_{21^{\circ}C}} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\frac{dU}{dT} [db] = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot \lg \frac{0,113}{0,120} \cdot 50$$

⇒

$$\boxed{\frac{dU}{dT} = -2,6 \left[\frac{db}{mK} \right]}$$

⇒

$$\frac{dU}{dL} = -1800,2 \left[\frac{db}{m} \right]$$

⇒

$$\boxed{\frac{dU}{dL} \approx -1,8 \cdot 10^{-3} \left[\frac{db}{\mu m} \right]}$$

- Abschlussbemerkungen:

Bei einer geeigneten Auswahl des Krümmungsradiuses und einem sauberen Aufbau (z. B. gleitfähige Oberfläche des Rohres zur Vermeidung von Dämpfungsspitzen) ist die Realisierung **dämpfungsverändernder Regelglieder** möglich.

Oder:

Bei einer geeigneten Auswahl des Krümmungsradiuses und einem sauberen Aufbau (z. B. gleitfähige Oberfläche des Rohres zur Vermeidung von Dämpfungsspitzen) ist die Realisierung **dämpfungsarmer Regelglieder** möglich.