

---

# Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie

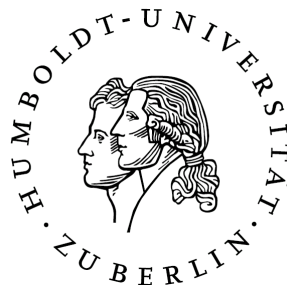
**- Gehäuse, Phasenstabilisierung, Fasereinbau -**

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 2

- Vorbetrachtungen:

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

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

Die Normalspannung „ $\sigma$ “ in einem Stoff ist definiert durch das Hookesche Gesetz:

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

Dabei ist „ $E$ “ das Elastizitätsmodul des Stoffes und „ $\varepsilon$ “ die Dehnung:

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

⇒

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

Für eine Glasfaser sind „ $E$ “ und „ $\alpha$ “ 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 „ $\Delta T_{\max}$ “ 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 „ $d_0 = 70\text{mm}$ “ umwickelt mit einer Standard- Monomodefaser zugfest eingespannt und  $N = 9$  Windungen:

$$L_0 = 9 \cdot \pi \cdot 70 \cdot 10^{-3}$$

⇒

$$L_0 = 1,979[m]$$

Die Längenänderung „ $\Delta L$ “ infolge Erwärmung des Rohres:

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

⇒

$$\Delta L = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 1,979 \cdot \Delta T$$

⇒

$$\Delta L[m] = 45,52 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

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

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

⇒

$$\varepsilon = \frac{45,52 \cdot 10^{-6}}{1,979} \cdot \Delta T$$

⇒

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

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 „ $\Delta T$ “:

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

⇒

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

⇒

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

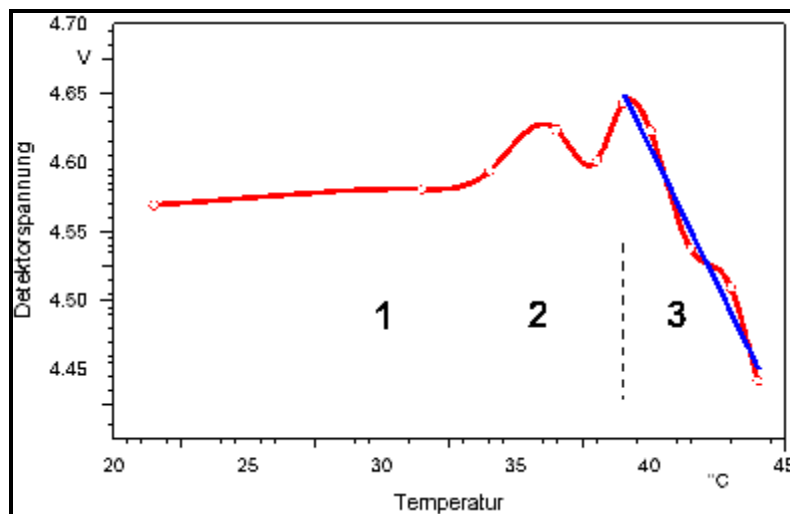
Der Normalspannungsaufbau ist, wie letztendlich erwartet, unabhängig von der Anzahl der Windungen und dem Durchmesser des Wickelrohres, jedoch bestimmt vom linearen Ausdehnungskoeffizienten des Rohres und dem Elastizitätsmodul der Faser.

- Messwerte:

Es wurden insgesamt 10 Messungen durchgeführt, bei dem das Rohr schrittweise von etwa 20 auf 44°C erwärmt wurde. Die dazugehörige Tabelle mit den Mittelwerten der gemessenen Detektorspannung:

T[°C]	U[V]
21,5	4,56918
31,5	4,58047
34,0	4,59391
36,5	4,62344
38,0	4,60111
39,0	4,64295
40,0	4,62263
41,5	4,53735
43,0	4,50943
44,0	4,44200

Das dazu generierte Diagramm:



Das Diagramm der ermittelten Messwerte (rot) mit einer Einteilung in drei Zonen und einer eingezeichneten linear regressierten Funktion (blau) der dritten Zone.

- Auswertung:

Das Diagramm der ermittelten Messwerte wurde in drei Zonen eingeteilt:

### Zone 1:

In der ersten Zone ist lediglich ein leichter Anstieg der detektierten optischen Leistung zu erkennen. Die gewickelte Faser scheint transparenter zu werden. Mit großer Sicherheit liegt diese trotz sorgfältiger Wicklung um den Ring nicht

vollständig auf dessen Oberfläche auf und erleidet somit trotz Vergrößerung des Durchmessers infolge thermischer Ausdehnung keine Dämpfung durch Normalspannung.

Das Ansteigen der Detektorspannung selbst kann durch (thermische) Langzeitdrift im Versuchsaufbau (außer die Faser natürlich) begründet sein oder die Erwärmung der Faser bewirkt eine positive Veränderung der Absorptions- und/oder Streuzentren innerhalb der Faser.

### Zone 2:

In der Zone 2 sind wie in „Dämpfung in der Faser infolge Normalspannung Typ 1“ Sprünge in der Detektorspannung zu erkennen. Mit Sicherheit liegt die Faser an der Oberfläche des Ringes nun an und erleidet Dämpfung durch Normalspannung. Der Schlupf auf der Ringoberfläche bewirkt zwischenzeitliche Entlastung und damit die bekannten Sprünge.

### Zone 3:

Die Faser liegt nun vollständig und homogen auf der Ringoberfläche auf, erleidet jetzt Dämpfung durch Normalspannung und nur noch leichte Sprünge infolge Schlupf. Die Messwerte in Zone 3 wurden linear regressiert. Die dazugehörige Berechnungsgrundlage ist ermittelt worden mit:

$$U[V] = 6,192 - 0,03954 \cdot T[^\circ\text{C}]$$

Diese Funktion bezieht sich mit absoluten Temperaturangaben und wurden umgewandelt in relative Messwerte „ $\Delta T$ “:

$$U[V] = 4,650 - 0,03954 \cdot \Delta T$$

Damit ist der Temperaturgradient der Faser ermittelt mit:

$$\frac{dU}{dT} = -39,54 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{V}{K} \right]$$

⇒

$$\frac{dU}{dT} = -39,54 \left[ \frac{mV}{K} \right]$$

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  $-60\mu\text{V/K}$  angegeben.

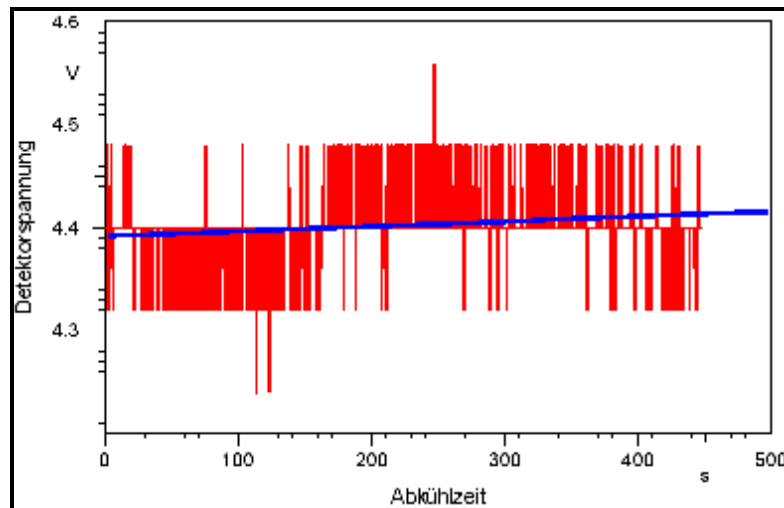
- Auswertung:

Der ermittelte Temperaturgradient ist viel zu hoch (etwa 660x höher) als der theoretisch vorausgesagte. Die Messmethode des Mittelwertes ist zwar hier qualitativ aussagekräftig, jedoch nicht quantitativ.

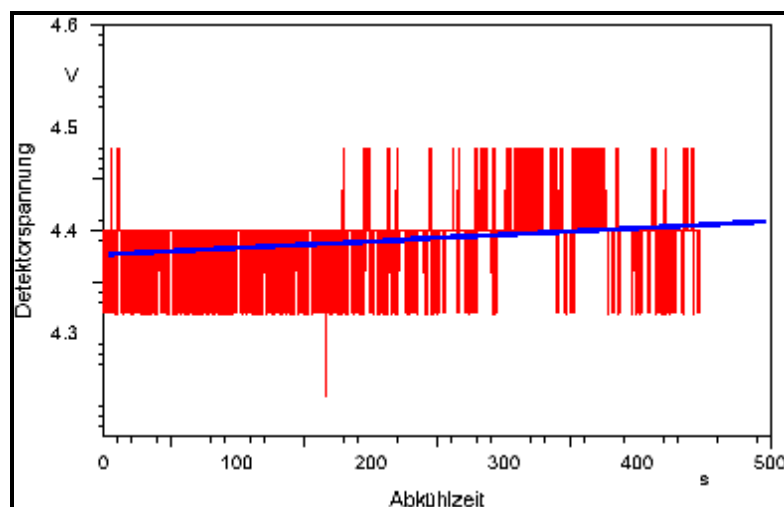
Daher wurden noch 3 Stressmessungen durchgeführt.

- Messwerte:

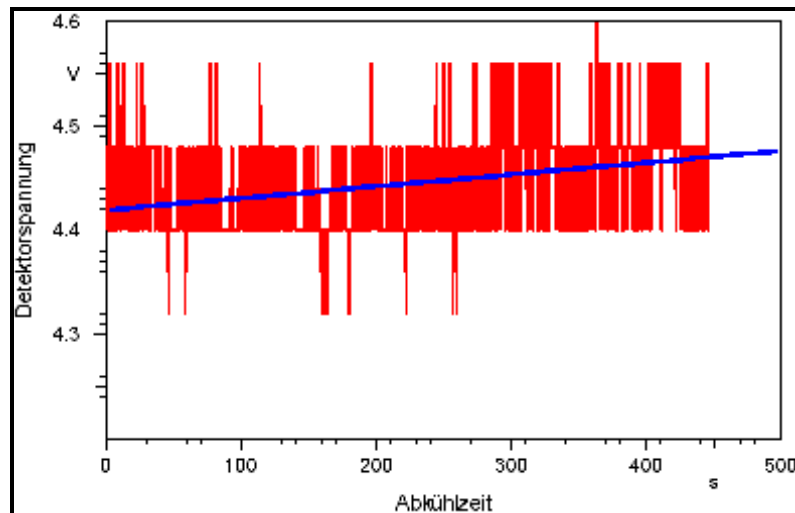
Es wurden drei Stressmessungen durchgeführt, bei dem das Rohr von etwa 44°C auf 21°C abgekühlt wurde (ein Aufheizen war durch die geringe Heizleistung des zur Verfügung stehenden Heizelements nicht möglich). Die dazugehörigen Grafen mit den linear regressierten Funktionen:



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:

Die errechneten linearen Funktionen:

Messung 1:  $4,391\,762\,31 + 48,4372 \cdot 10^{-6} \cdot t$

Messung 2:  $4,377\,336\,13 + 64,4378 \cdot 10^{-6} \cdot t$

Messung 3:  $4,419\,997\,90 + 113,7200 \cdot 10^{-6} \cdot t$

Der Durchschnitt:

$$U[V] = 4,396 + 75,532 \cdot 10^{-6} \cdot t$$

Die Abkühlung erfolgte über ein Zeitraum von etwa 450 Sekunden um durchschnittlich 11 Kelvin, so kann die Zeit „t“ durch die Temperatur „T“ substituiert werden.

$$U[V] = 4,396 + 1,700 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T$$

Damit ist der Temperaturgradient der Faser ermittelt mit:

$$\frac{dU}{dT} = +3,09 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{V}{K} \right]$$

⇒

$$\boxed{\frac{dU}{dT} = +3,09 \left[ \frac{mV}{K} \right]}$$

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.



Im vorliegenden Fall ist immer noch eine 51,5- fache Überhöhung ermittelt worden. Das positive Vorzeichen rührt von der Tatsache, dass die Stressmessung durch Abkühlung erfolgte und nicht wie sonst durch Aufheizen,

- 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:

$$\Delta L = 45,52 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

⇒

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = 21,968 \cdot 10^3$$

Mit:

$$\frac{dU}{dT} = +3,09 \left[ \frac{mV}{K} \right]$$

⇒

$$\frac{dU}{dL} = +67,88 \left[ \frac{V}{m} \right]$$

⇒

$$\frac{dU}{dL} \approx 70 \left[ \frac{\mu V}{\mu m} \right]$$

- 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.