
Aufbau von faserbasierten Interferometern für die Quantenkryptografie

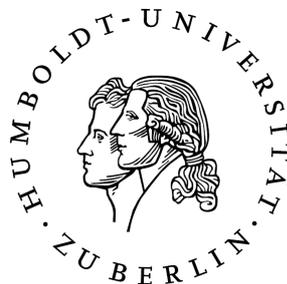
- Gehäuse, Phasenstabilisierung, Fasereinbau -

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

Berechnung ausgewählter Parameter für eine beliebige Faserlängenänderung unter Nutzung eines Piezorohres.

Inhalt:

- Phasenverschiebung „ $\Delta\varphi$ “
- Erzielte Zeitverzögerung „ Δt “
- Benötigte Windungsanzahl „ N_0 “
- Benötigte Faserlänge „ L_0 “
- Lagenanzahl „ N_n “ (ohne seitliche Begrenzung)
- Lagenanzahl „ N_n “ (mit seitlicher Begrenzung)
- Querkontraktionseinfluss - Maximale Anzahl an Lagen „ n_{\max} “
- Querkontraktionseinfluss - Maximale Faserdehnung „ ΔL_{\max} “
- Dämpfung infolge Biegung der Faser
- Stromfluss „ $I(t)$ “, Spitzenleistung „ P_S “, Lastwiderstand „ R_I “ am Piezoring als kapazitive Last
- Zusammenfassung – Vorgeschlagener Aufbau des piezoelektronischen Stabilisators
- Zusammenfassung – Theoretisch erreichbare Parameter
- Zusammenfassung – Skizze zum vorgeschlagenen Aufbau.

- **Phasenverschiebung „ $\Delta\varphi$ “:**

Basierend auf:

Berechnung der benötigten Faserlängenänderung und Spannung für eine Phasenverschiebung von $\varphi = \pm\pi$ bei Nutzung eines Piezorohres.

Gegeben ist der Zusammenhang zwischen Weglängenänderung „ ΔL “ und Laufzeitdifferenz „ Δt “ in einer Faser durch:

$$\Delta L = \frac{c}{n} \cdot \Delta t$$

Auch bekannt ist der Zusammenhang zwischen Laufzeitdifferenz „ Δt “ und einer Phasenverschiebung „ $\Delta\varphi$ “:

$$\Delta t = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{n}{c} \cdot \Delta\varphi$$

Eingesetzt:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta L$$

Anwendung:

Bei einer angestrebten Faserlängenänderung von 1mm mit einer Wellenlänge von 1550nm ergäbe dies eine Phasenverschiebung von:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{1550 \cdot 10^{-9}} \cdot 1 \cdot 10^{-3}$$

⇒

$$\Delta\varphi = \frac{20 \cdot 10^3}{31} \cdot 2\pi \approx 645,2 \cdot 2\pi \approx 1290,3 \cdot \pi$$

- **Erzielte Zeitverzögerung „ Δt “:**

Aus oben kann ermittelt werden:

$$\Delta t = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{n}{c} \cdot \Delta\varphi$$

Anwendung:

Mit oben angegebenen Werten $\Delta L = 1\text{mm}$ und einer Brechzahl von $n = 1,444$ bei 1550nm (Quarzglas):

$$\Delta t = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{n}{c} \cdot \Delta\varphi$$

\Rightarrow

$$\Delta t = \frac{1550 \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \frac{1,444}{299782 \cdot 10^3} \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{31} \cdot 2\pi$$

\Rightarrow

$$\Delta t = 4,82 \cdot 10^{-12} \text{ s} \equiv 4,82 \text{ ps}$$

- **Benötigte Windungszahl „ N_0 “:**

Für eine Faserdehnung „ ΔL “ um ein Piezorohr „ ΔU “ wäre eine Radienänderung „ Δd “ nötig von:

$$N \cdot \pi \cdot \Delta d_{\max} = \Delta L = N \cdot \Delta U$$

Aus dieser Überlegung lässt sich die nötige Windungszahl ableiten:

$$N \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\Delta L}{\Delta d_{\max} \cdot \pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta d_{\max} \cdot \pi}$$

⇒

$$N = \frac{\Delta \varphi}{\Delta d_{\max}} \cdot \frac{\lambda}{2\pi^2}$$

Anwendung:

Mit Piezorohr 74x20x4 laut Datenblatt $\Delta d_{\max} = 5\mu\text{m}$ und den oben gewählten Werten:

$$N = \frac{20 \cdot 10^3}{31 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} \cdot 2\pi \cdot \frac{1550 \cdot 10^{-9}}{2\pi^2}$$

⇒

$$N = \frac{200}{\pi} \approx 64$$

- **Benötigte Faserlänge „ L_0 “:**

Aus der allgemeinen Kreisumfangsgleichung kann die benötigte Faserlänge abgeschätzt werden:

$$N \cdot \pi \cdot d_0 = L_0 = N \cdot U_0$$

⇒

$$L_0 = N \cdot \pi \cdot d_0$$

Anwendung:

Mit Piezorohr 74x20x4:

$$L_0 = 64 \cdot \pi \cdot 74 \cdot 10^{-3}$$

⇒

$$L_0 = 4,736 \cdot \pi \approx 14,88m$$

- **Lagenanzahl „ N_n “ (ohne seitliche Begrenzung):**

Die benötigte Anzahl an Windungen wird mit „ $N = N_0$ “ bezeichnet. Das übereinander Legen in Lagen ohne seitliche Begrenzung in die Nuten der unten liegenden Lage erfolgt nach folgenden Vorschriften:

1- lagig:

$$N_1 = \frac{N_0}{1} - 0$$

⇒

$$N_1 = N_0 - 0$$

2- lagig:

$$N_2 = \left(\frac{N_0}{2} - 0 \right) + \left(\frac{N_0}{2} - 1 \right)$$

⇒

$$N_2 = N_0 - 1$$

3- lagig:

$$N_3 = \left(\frac{N_0}{3} - 0 \right) + \left(\frac{N_0}{3} - 1 \right) + \left(\frac{N_0}{3} - 2 \right)$$

⇒

$$N_3 = N_0 - 3$$

n- lagig:

$$N_n = \left(\frac{N_0}{n} - 0 \right) + \dots + \left(\frac{N_0}{n} - (n-1) \right)$$

⇒

$$N_n = N_0 - \sum_{i=1}^n (i-1)$$

⇒

$$N_n = N_0 - \frac{1}{2} n \cdot (n-1)$$

Die maximale Anzahl der Lagen ist bestimmt durch:

$$N_0 - \frac{1}{2} n \cdot (n-1) > 0$$

⇒

$$n < \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2N_0}$$

Für $N_0 \gg 0$:

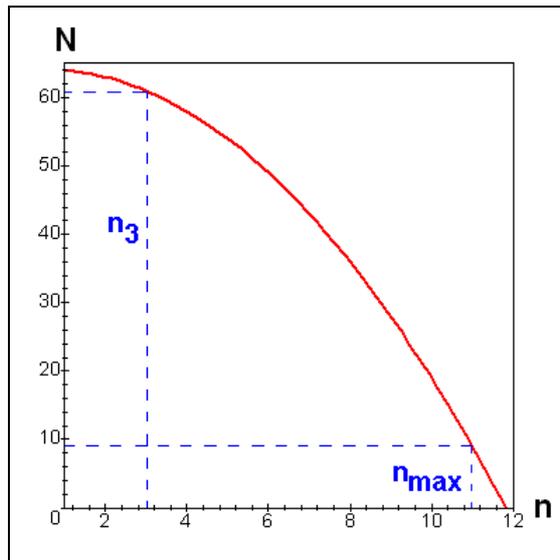
$$n < \sqrt{2N_0}$$

Anwendung:

Der gegebene Piezoring 74x20x4 soll mit $N_0 = 64$ Wicklungen bestückt werden. Folgende Lagenaufteilungen sind möglich mit den dazu gehörigen „Fehlwicklungen“:

$$N_n = 64 - \frac{1}{2}n \cdot (n-1)$$

⇒



Anzahl der Gesamtwindungen infolge der Aufteilung in Lagen.

Bis zu drei Lagen kommt es zu keiner nennenswerten Anzahl an „Fehlwicklungen“. Danach müssen Korrekturwindungen aufgetragen werden. Ab 11 Lagen ist keine sinnvolle Aufteilung mehr möglich.

1- lagig:

$$N_1 = \frac{64}{1} - 0 = 64$$

⇒



2- lagig:

$$N_2 = \left(\frac{64}{2} - 0\right) + \left(\frac{64}{2} - 1\right) = 32 + 31 = 63$$

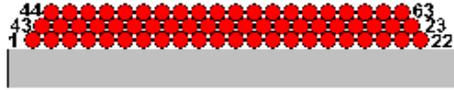
⇒



3- lagig:

$$N_3 = \binom{64}{3} - 0 + \binom{64}{3} - 1 + \binom{64}{3} - 2 = 22 + 21 + 20 = 63$$

⇒



n_{max}- (11-) lagig (mit Korrekturwindungen):

Die Korrekturwindungen „K“ berechnen sich aus der Tatsache, dass die Hälfte an n-Wicklungen pro Lage zusätzlich aufgetragen wird, unter der Tatsache, dass die exakt mittigen Windungen weder zur linken noch zur rechten Seite zugeordnet werden können, wird um die Hälfte an „n-1“ der Wert „K“ wieder reduziert. So ergibt sich:

$$N_n = N_0 - \sum_{i=1}^n (i-1) + K$$

Mit:

$$K = \frac{1}{2}n \cdot n - \frac{1}{2}(n-1) = \frac{1}{2}(n-1)^2 + \frac{1}{2}n$$

⇒

$$N_n = N_0 + \frac{1}{2}$$

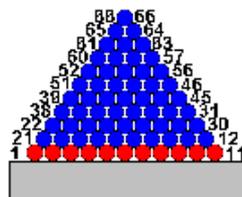
Für die maximale Konfiguration von 11 Lagen:

$$N_{11} = \binom{64}{11} - 0 + \binom{64}{11} - 1 + \dots + \binom{64}{11} - 9 + \binom{64}{11} - 10 + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot (11-1)^2 + \frac{1}{2} \cdot 11}_K$$

⇒

$$N_{11} = 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 + 0 - 1 - 2 - 3 - 4 + \underbrace{50 + 5}_K = 11 + \underbrace{55}_K = 66$$

⇒



Blau = Korrekturwindungen, **Rot** = „originale“ Windungen

Bei größeren Lagenanzahlen kommt es erwartungsgemäß zu Rundungsabweichungen.

- **Lagenanzahl „ N_n “ (mit seitlicher Begrenzung):**

Jede Zerlegung von N_0 in seine Primzahlen erlaubt die Aufteilung in vollständige Wicklungslagen. Die Anzahl der Primzahlen „ P “ bestimmt die Möglichkeiten „ M “ der Aufteilung „Windungen pro Lage“.

$$M = P \cdot (P - 1) + 2$$

Diese allgemeine Berechnungsgrundlage kann für vorliegende spezielle Konfigurationen Windungs- Lagen- Kombinationen voraussagen, welche in der Praxis keine Anwendung ergeben. Eine Überprüfung am konkreten Fall ist unbedingt vonnöten.

Anwendung:

Der gegebene Piezoring 74x20x4 soll mit $N_0 = 64$ Wicklungen bestückt werden. Folgende Lagenaufteilungen sind möglich:

Zerlegung in Primzahlen:

$$N_0 = 64 = 2^6$$

Bestimmung von „ M “:

$$M = 6 \cdot 5 + 2 = 32$$

Exakt 32 Wicklungsmöglichkeiten sind im vorliegenden Fall bestimmbar. Davon sind jedoch vier jeweils gleich, da die Zerlegung mit nur einer Primzahl erfolgen konnte. Zusätzlich entfällt eine Möglichkeit, da „ P “ mit 6 geradzahlig ist:

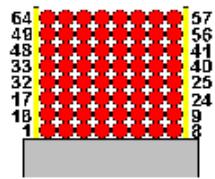
$$M = \frac{P \cdot (P - 1) + 2}{4} - 1 = \frac{1}{4} P \cdot (P - 1) - \frac{1}{2}$$

⇒

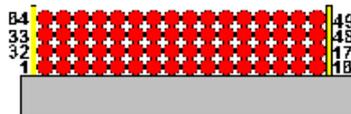
$$M = \frac{1}{4} 6 \cdot 5 - \frac{1}{2} = 7$$

Möglichkeit	Windungen	Lagen	Aufbau
1	1	64	nicht sinnvoll
2	2	32	nicht sinnvoll
3	4	16	nicht sinnvoll
4	8	8	möglich
5	16	4	sinnvoll
6	32	2	sinnvoll
7	64	1	sinnvoll

8 Windungen mit 8 Lagen:



16 Windungen mit 4 Lagen:



32 Windungen mit 2 Lagen:



64 Windungen mit 1 Lage:



- **Querkontraktionseinfluss - Maximale Anzahl an Lagen „ n_{\max} “:**

Basierend auf:

Berechnung des effektiven Durchmessers mehrlagiger Systeme. Teil 3: Querkontraktion als wicklungslagenlimitierende Größe.

Die maximale Anzahl an Lagen infolge Querkontraktionseinfluss ist definiert durch:

$$n < 1 + \frac{v \cdot d_0}{d_F} \quad \text{oder} \quad n < 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v \cdot d_0 - \Delta d_{\max}}{d_F}$$

Wobei der kleinere Wert von „ n “ die limitierende Angabe darstellt.

Anwendung:

Der gegebene Piezoring 74x20x4 soll mit $N_0 = 64$ Wicklungen bestückt werden. Der Querkontraktionsbeiwert beträgt typischerweise 0,3 und der Faserdurchmesser $125\mu\text{m}$:

$$n < 1 + \frac{0,3 \cdot 74 \cdot 10^{-3}}{125 \cdot 10^{-6}} \quad \text{oder} \quad n < 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,3 \cdot 74 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-6}}{125 \cdot 10^{-6}}$$

\Rightarrow

$$n < 179 \quad \text{oder} \quad n < 90$$

\Rightarrow

$$n_{\max} = 90$$

Mit „ $n_{\max} = 90$ Lagen“ ist der Einfluss der Querkontraktion auf die Wirkung des Piezoringes nicht zu erwarten.

- **Querkontraktionseinfluss - Maximale Faserdehnung „ ΔL_{\max} “:**

Um einen Faserbruch zu vermeiden, muss „ ΔL “ limitiert werden:

$$\Delta L_{\max} = N_0 \cdot \pi \cdot \left(\Delta d_{\max} + \left(d_F - D \cdot \frac{d_F}{v \cdot d_0} \right) \cdot (n_{\max} - 1) \right) \geq \Delta L$$

Mit:

$$D = \Delta d_{\max} + d_F \cdot (n_{\max} - 1)$$

Anwendung:

Der gegebene Piezoring 74x20x4 soll mit $N_0 = 64$ Wicklungen bestückt werden. Der Querkontraktionsbeiwert beträgt für Quarzglas 0,3 und der Faserdurchmesser $125\mu\text{m}$. Die maximale Lagenanzahl sei „8“:

$$D = 5 \cdot 10^{-6} + 125 \cdot 10^{-6} \cdot (8 - 1)$$

\Rightarrow

$$D = 880 \cdot 10^{-6} = 0,88\text{mm}$$

Sowie:

$$64 \cdot \pi \cdot \left(5 \cdot 10^{-6} + \left(125 \cdot 10^{-6} - 880 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{125 \cdot 10^{-6}}{0,3 \cdot 74 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot (8 - 1) \right) \geq 1\text{mm}$$

\Rightarrow

$$170 \cdot 10^{-3} \geq 1 \cdot 10^{-3}$$

Ein Faserbruch ist nicht zu erwarten.

- **Dämpfung infolge Biegung der Faser:**

Basierend auf:

Biegung einer Faser und die dabei auftretende Leistungsdämpfung.

Gegeben ist die Berechnungsgrundlage der zu erwartenden Dämpfung:

$$U[db] = N_0 \cdot 10 \cdot \lg \frac{15,5 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta d_{\max} \cdot e^{0,717733 \cdot \Delta d_{\max}}}{\sqrt{1 + (15,5 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta d_{\max} \cdot e^{0,717733 \cdot \Delta d_{\max}})^2}}$$

Wobei „ Δd_{\max} “ mit der Einheit „mm“ einzusetzen ist.

Anwendung:

Der gegebene Piezoring 74x20x4 soll mit $N_0 = 64$ Wicklungen bestückt werden:

$$U[db] = 64 \cdot 10 \cdot \lg \frac{15,5 \cdot 10^{-6} \cdot 74 \cdot e^{0,717733 \cdot 74}}{\sqrt{1 + (15,5 \cdot 10^{-6} \cdot 74 \cdot e^{0,717733 \cdot 74})^2}}$$

⇒

$$U[db] = 0,000000000...$$

Es ist keine messbare Dämpfung zu erwarten.

- **Stromfluss „I(t)“, Spitzenleistung „P_s“, Lastwiderstand „R_l“ am Piezoring als kapazitive Last:**

Stromfluss „I(t)“:

Der Stromfluss am Kondensator kann beschrieben werden durch:

$$I(t) = C \cdot \frac{d}{dt} U$$

Aus dieser Berechnungsgrundlage kann die maximale „Signal- Rising- Time“ (Signalanstiegszeit) berechnet werden. Ist der maximale Spannungshub des Piezos bekannt, kann die höchstmögliche Ansteuerfrequenz ermittelt werden.

$$\left(\frac{d}{dt} \right)_{\max} = f_{\max} = \frac{1}{C} \cdot \frac{I_{\max}}{U_{\max}}$$

Die so ermittelte maximale Anstiegszeit ist daher abhängig von der vom Netzteil zur Verfügung gestellten größtmöglichen Stromstärke und der Kapazität des Piezoringes.

Anwendung:

Vom Netzteil wird eine Maximalstromstärke von I_{\max} erwartet. Der gegebene Piezoring 74x20x4 besitzt eine Kapazität von 20nF laut Datenblatt und erwartet einen maximalen Spannungshub von 1000V.

I_{\max}	$\left(\frac{d}{dt} U \right)_{\max}$	f_{\max} bei 1000V U_{\max}
1 μ A	50V/s	50mHz
10 μ A	500V/s	0,5Hz
100 μ A	5 000V/s	5Hz
1mA	50 000V/s	50Hz
10mA	500 000V/s	500Hz
100mA	5 000 000V/s	5kHz
1A	50 000 000V/s	50kHz
10A	500 000 000V/s	500kHz

Zu beachten ist der Resonanzfall bei 13kHz und 80kHz laut Datenblatt.

Spitzenleistung „ P_s “:

Die umgesetzte Spitzenleistung lässt aus dem Stromfluss ermitteln:

$$I(t) \cdot U_{\max} = P_s = C \cdot \frac{d}{dt} U \cdot U_{\max}$$

Bei einer sinusförmigen Ansteuerung kann die mittlere Leistung beschrieben werden durch:

$$\bar{P} = \frac{P_s}{\pi} = C \cdot \frac{d}{dt} U \cdot \frac{U_{\max}}{\pi}$$

Anwendung:

Vom Netzteil wird eine Maximalstromstärke von I_{\max} erwartet. Der gegebene Piezoring 74x20x4 besitzt eine Kapazität von 20nF laut Datenblatt und erwartet einen maximalen Spannungshub von 1000V.

I_{\max}	P_s	P/π
1 μ A	1mW	0,318mW
10 μ A	10mW	3,18mW
100 μ A	0,1W	31,8mW
1mA	1W	0,318W
10mA	10W	3,18W
100mA	100W	31,8W
1A	1kW	318W
10A	10kW	3,18kW

Lastwiderstand „ R_I “:

Der Piezoring wird über das Netzteil entladen, daher muss dieses einen minimalen Innenwiderstand „ R_I “ bereitstellen. Das zeitliche Verhalten der Entladespannung am Piezo lässt sich beschreiben durch:

$$U(t) = U_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{R_I \cdot C}}$$

⇒

$$\tau = \frac{1}{f} = R_I \cdot C$$

Damit ist „ R_I “ definiert:

$$R_I = \frac{1}{f \cdot C} = \frac{\tau_{\max}}{C}$$

Zu beachten ist, das I_{\max} bei gegebenen U_{\max} andererseits auch von R_I bestimmt wird, so dass gelten muss:

$$\frac{U_{\max}}{I(t)_{\max}} \leq R_I = \frac{\tau_{\max}}{C}$$

Anwendung:

Vom Netzteil wird eine Maximalstromstärke von I_{\max} erwartet. Der gegebene Piezoring 74x20x4 besitzt eine Kapazität von 20nF laut Datenblatt und erwartet einen maximalen Spannungshub von 1000V.

I_{\max}	τ_{\max}	R_I
1 μ A	20s	1 000 000 000 Ω
10 μ A	2s	100 000 000 Ω
100 μ A	0,2s	10 000 000 Ω
1mA	20ms	1 000 000 Ω
10mA	2ms	100 000 Ω
100mA	0,2ms	10 000 Ω
1A	20 μ s	1 000 Ω
10A	2 μ s	100 Ω

- **Zusammenfassung:**

Vorgeschlagener Aufbau des piezoelektronischen Stabilisators:

1. Genutzt wird der Piezoring 74x20x4 mit einem spannungsabhängigen Hub des Durchmessers „ $\Delta d_{\max} = 5\mu\text{m}$ “ bei „ $U_{\max} = 1000\text{V}$ “. Bestückt mit „ $N = 64$ “ Windungen einer Monomodefaser „ $d_{\text{Faser}} = 125\mu\text{m}$ “ lässt sich trotz Einsatz eines Mounting- Ringes die Lagenanzahl „ $n = 1$ “ erzielen. Dadurch ist ein Einfluss der Querkontraktion 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 erwünschten „ $\Delta L = 1\text{mm}$ “ angeben, das entspricht einer Phasenverschiebung von „ $645 \cdot 2\pi$ “ 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.
2. Beim Bewickeln des Piezoringes 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 Vorspannung unterhalb der Faserbruchdehnung erforderlich. Praktischerweise wird die Vorspannung der Faser nicht in jeder Windung gleich sein. Deshalb ist vor dem Einsatz im vorgesehenen Interferometer eine künstliche Alterung durchzuführen. Dabei werden die unterschiedlichen Vorspannungen in den Windungen durch Schlupf ausgeglichen, was sich als Sprünge in den Charakteristika des Piezoringes ausmachen lässt. Nach mehreren Durchläufen über den gesamten Spannungshub des Piezos dürften diese Sprünge nicht mehr auftreten. Die Möglichkeit des Aufwickelns bei angelegten 1000V dann ohne Faser-vorspannung könnte ebenso in Erwägung gezogen werden.
3. Eine genauere Betrachtung sollte den Anschlüssen am Piezoring gehören. Insbesondere die technologische Lösung des Übergangs loser Faseranschluss zu vorgespannter Faserwicklung auf dem Ring.
4. Für die Effekte frequenzbedingte Resonanz, thermische Drift, Parameter-Offset infolge Alterung, ... sollten extra praktische Untersuchungen durchgeführt werden. Dies erfordert im Vornherein den Aufbau eines geschlossenen Regelkreislaufes zur Überwachung und Einhaltung des geforderten Wertes von „ $\Delta\varphi$ “ oder „ Δt “ oder „ ΔL “.

5. Für die genaue Dimensionierung des Netzteils und dessen technologische Gestaltung muss eine extra Untersuchung angestrebt werden.

Theoretisch erreichbare Parameter:

Allgemeine Charakteristika laut Datenblatt:

Bezeichner	Charakteristika	Einheit
Piezoring	PiT74**	-
Außendurchmesser	74	mm
Ringhöhe	20	mm
Wandstärke	4	mm
Mounting Socket	Nicht vorhanden	-
Ansteuerspannung max.	± 1000	V
Elektrische Kapazität	20	nF
Radiale Kontraktion max.	5*	μm
Axiale Kontraktion max.	2*	μm
Radiale Resonanz typ.	13	kHz
Axiale Resonanz typ.	80	kHz
Innere Elektrode	Silber, ganzflächig	-
Äußere Elektrode	Silber, ganzflächig	-

* Für eine Ansteuerung von 0V bis 1000V.

** Aktivierungshinweise des Herstellers beachten!

Elektrooptische Parameter, theoretisch*:

Bezeichner	Parameter	Einheit
Windungsanzahl	$N_0 = 64$	-
Lagenanzahl	$n = 1$	-
Faserlänge	$L_0 \approx 15$	m
Längenänderung max.	$\Delta L_{\text{max}} = 1$	mm
Phasenverschiebung max.	$\Delta\varphi = 645$	2π
Zeitverzögerung max.	$\Delta t = 4,8$	ps
Spannungsgesteuerte Längenänderung	$\frac{\Delta L}{U_{\text{max}}} = 1$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{V}}$
Spannungsgesteuerte Phasenverschiebung**	$\frac{\Delta\varphi}{U_{\text{max}}} = 0,65$	$\frac{2\pi}{\text{V}}$
Spannungsgesteuerte Zeitverzögerung	$\frac{\Delta t}{U_{\text{max}}} = 4,8$	$\frac{\text{fs}}{\text{V}}$

* Alle Parameter bei einer Ansteuerung von 0V bis 1000V

** Für eine Monomodefaser bei 1550nm.

** Spannungsgesteuerte Phasenverschiebung, daraus folgt:

$$\frac{\Delta\varphi}{U_{\max}} = 0,65 \left[\frac{2\pi}{V} \right]$$

⇒

$$\frac{U_{\max}}{\Delta\varphi} = 0,775 \left[\frac{V}{\pi} \right]$$

Dieser Wert gilt für „ $N_0 = 64$ “ Windungen. Soll der Wert für eine Windung ermittelt werden, ist N_0 zu multiplizieren:

$$\frac{U_{\max}}{\Delta\varphi} \cdot N_0 = 0,775 \cdot \frac{200}{\pi} \left[\frac{V}{\pi} \right]$$

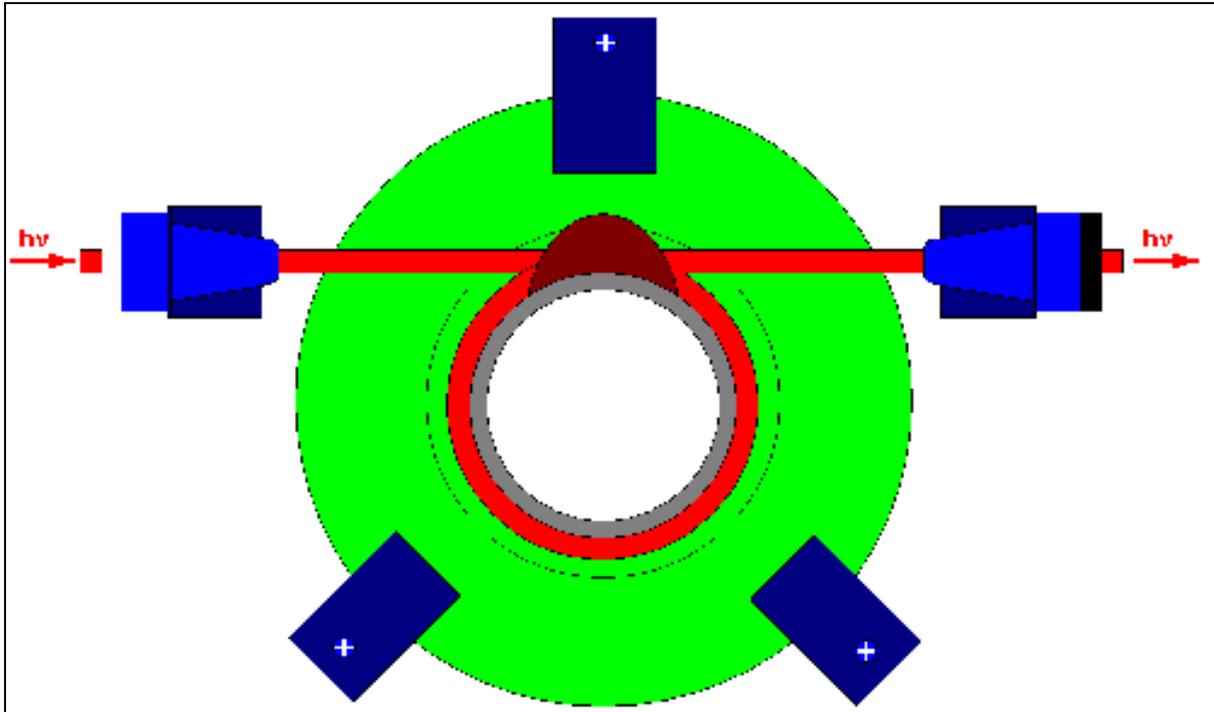
⇒

$$\frac{U_{\max}}{\Delta\varphi} \cdot N_0 = 49,34 \approx 50 \left[\frac{V}{\pi} \right]$$

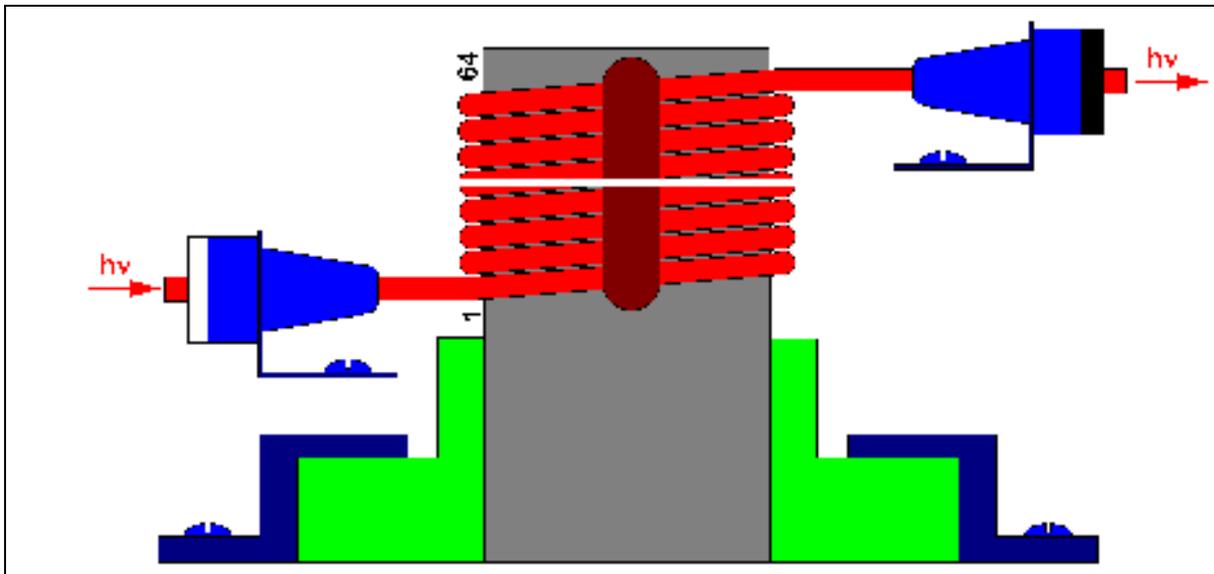
Dieser Wert wird bestätigt durch:

Berechnung der benötigten Faserlängenänderung und Spannung für eine Phasenverschiebung von $\varphi = \pm\pi$ bei Nutzung eines Piezorohres.

- **Zusammenfassung – Skizze zum vorgeschlagenen Aufbau.**



Schematischer Aufbau des Piezoelektrischen Stabilisators – Draufsicht.
(nicht maßstabgerecht, Seitenverhältnisse nicht exakt)



Schematischer Aufbau des Piezoelektrischen Stabilisators – Seitenansicht.
(nicht maßstabgerecht, Seitenverhältnisse nicht exakt)