

Michelson-Interferometer

Physikalisches Anfängerpraktikum 2.1

Jan A. Kesting

Betreuer/in: Josch Hagedorn

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
1.1 Ziel/Motivation	2
1.2 Aufgaben	2
1.3 (physikalische) Grundlagen	2
3 Auswertung	10
3.1 Bestimmung der Wellenlänge des grünen Lichts	10
3.2 Berechnung des Brechungsindex von Luft	11
3.3 Messung der Kohärenzlänge der Leuchtdiode	12
3.4 Vergleich der ermittelten Werte	14
4 Zusammenfassung und Diskussion	15
4.1 Zusammenfassung	15
4.2 Diskussion	15
5 Anhang	16

1 Einleitung

1.1 Ziel/Motivation

Im folgenden Versuch will man die grundlegenden Eigenschaften von Licht (eine elektromagnetische Welle) mithilfe eines Michelson-Interferometers messen. So soll hier die Wellenlänge eines Lasers, der Brechungsindex von Luft und die Kohärenzlänge einer Leuchtdiode bestimmt werden.

1.2 Aufgaben

1. Vermessen der Wellenlänge eines grünen Lasers.
2. Bestimmung des Brechungsindexes von Luft
3. Messung der Kohärenzlänge einer Leuchtdiode

1.3 (physikalische) Grundlagen

In diesem Versuch macht man sich für die Berechnungen hauptsächlich das Phänomen der Interferenz von Licht zunutze. Als Interferenz bezeichnet man die Überlagerung von Wellen, und da Licht nichts anderes ist als eine elektromagnetische Welle ist (EMW), kann auch Licht interferieren. Bei der Überlagerung von Wellen addieren sich dessen Amplituden. Da diese auch negativ sein können, gibt es sowohl **konstruktive**, als auch **destruktive Interferenz**. Im ersten Fall „verstärken“ sich zwei Wellenfronten; im zweiten löschen sie sich gegenseitig aus.

Zwei monochromatische Lichtwellen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

$$E_i(\mathbf{x}, t) = E_{i,0} e^{\omega t - \mathbf{k}_i \mathbf{x} + \phi} \quad (1)$$

Hierbei ist E_0 die Amplitude, ω die Frequenz, \mathbf{k} der Ausbreitungsvektor und ϕ die Phase des Lichts. Die messbare Intensität I ist stets proportional zum Amplitudenquadrat. Außerdem ist die Intensität noch abhängig der Phasenverschiebung. Die maximale Intensität I_{max} ist periodisch bei $\phi = 2m\pi$ und die minimale Intensität I_{min} dann bei $\phi = 2m\pi + 1$ wobei gilt $m \in \mathbb{Z}$.

Phasenverschiebungen können auch durch den **Gangunterschied**, der Unterschied der bereits vom Licht zurückgelegten Strecke, berechnet werden. So entspricht eine Phasenverschiebung $\phi = 2\pi$ einem Gangunterschied Δ einer Wellenlänge λ .

Man muss allerdings darauf achten, dass man sich nicht unbedingt in einem Vakuum befindet, sondern dass Licht durch ein Medium mit Brechungsindex n geht. Somit muss statt der Strecke s die optische Weglänge Λ verwendet werden. Somit bedingen sich minima und maxima bzgl. Gangunterschied zu:

$$\Delta_{max} = m\lambda \quad (2)$$

$$\Delta_{min} = \frac{2m+1}{2}\lambda \quad (3)$$

Als **kohärentes Licht** bezeichnet man jenes, welches eine konstante Phasenbeziehung aufweist. Bei nicht-kohärentem Licht ist die Phasenverschiebung statistisch verteilt, sodass der Interferenzterm verschwindet und somit keine Interferenz zu beobachten ist. Bei Lichtquellen ist normalerweise die Emissionsdauer τ eines Wellenzuges sehr gering und man kann über die konstante Lichtgeschwindigkeit c die **Kohärenzlänge** definieren:

$$L = c\tau \quad (4)$$

Diese Länge darf nicht größer als der Gangunterschied Δ werden. Zudem gelten die bisher erwähnten Beziehungen nur für monochromatische Lichtquellen. Letztere existieren aber gar nicht!(Heisenberg'sche Unschärferelation). Jede Lichtquelle, und somit auch Laser mit Frequenz ω , emittiert ein Licht mit einer gewissen Bandbreite $\Delta\omega$. Das austretende Licht befindet sich also im Frequenzspektrum

$$\omega = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (5)$$

Nimmt man die Bandbreite als Rechteckverteilung an, so lässt sich über Fourier folgenden Ausdruck für die Kohärenzlänge herleiten:

$$L = \frac{2\pi c}{\Delta\omega} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = B_H v \quad (6)$$

Letzterer Term ist eine Annäherung für die Kohärenzlänge über das entstehende Interferenzmuster. Man kann dies mit einem Gauß annähern und mittels der Verfahrgeschwindigkeit v des Spiegels (bei der Messung) und die Definition der Halbwertsbreite mit jenen Größen bestimmen:

$$B_H = 2\sqrt{2 \ln(2)\sigma} \quad (7)$$

Nun ist man auch direkt beim Michelson-Interferometer angelangt. Beim Interferometer trifft - einstellbar - entweder Interferenz gleicher Neigung oder Dicke auf. Ersteres findet statt, wenn ein Lichtbündel auf eine transparente und planparallele Platte der Dicke d und Brechungsindex n unter dem Winkel α trifft. Den Gangunterschied zweier („benachbarten“) Strahlengängen kann man folgendermaßen beschreiben:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} - \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

Dem Fall der Interferenz bei gleicher Dicke begegnet man bei parallelem Licht, welches auf eine Keilförmige Platte fällt. Bei kleinem Einfallwinkel lässt sich der entstehende Gangunterschied durch folgenden Term annähern (wie bei gleicher Neigung):

$$\Delta = 2d(s)\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} - \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

Bei senkrechtem Einfall dann als.

$$\Delta = dn - \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

Beim Interferometer gilt bei gleicher Neigung:

$$\Delta(\alpha = 0) = 2\Delta s - \frac{\lambda}{2} \quad (11)$$

Bei $s = \frac{\lambda}{2}$ ergibt sich ebenfalls ein Gangunterschied von $\Delta = \frac{\lambda}{2}$, sodass im Zentrum des entstehenden Kreisförmigen Interferenzmuster das Maximum 0. Ordnung liegt. Beim Kippen des oberen Spiegels verändert sich das Kreismuster in ein Streifenmuster, bei welchem auch eine Vergrößerung der Strecke s um $\frac{\lambda}{2}$ zur Entstehung einer neuen Interferenzordnung führt. Diese Prinzipien nutzt man nun zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichts: Man betreibt den Spiegel mit einem Motor, wobei gilt:

$$\lambda = 2 \frac{\Delta s}{\Delta m} \quad (12)$$

Zuletzt will man noch den Brechungsindex n von Luft bestimmen. Dazu wird in den Versuchsaufbau (im Messprotokoll zu finden) eine Glasküvette mit Luft installiert. In jener Küvette kann man den herrschenden Druck p variieren und messen. Ändert sich nun der Druck, so ändert sich um Δn . Mit der Länge a der Küvette und man kann die vorbeiziehenden Maxima zählen. Den Brechungsindex unter Normalbedingungen kann man dann folgendermaßen bestimmen:

$$n_0 = \frac{q\lambda p_0 T}{2aT_0 p} + 1 \quad (13)$$

Wobei $q = \frac{\Delta m}{\Delta p}$, p der Druck und T die Temperatur ist. Die mit 0 indizierten Größen sind die Größen unter Normalbedingungen

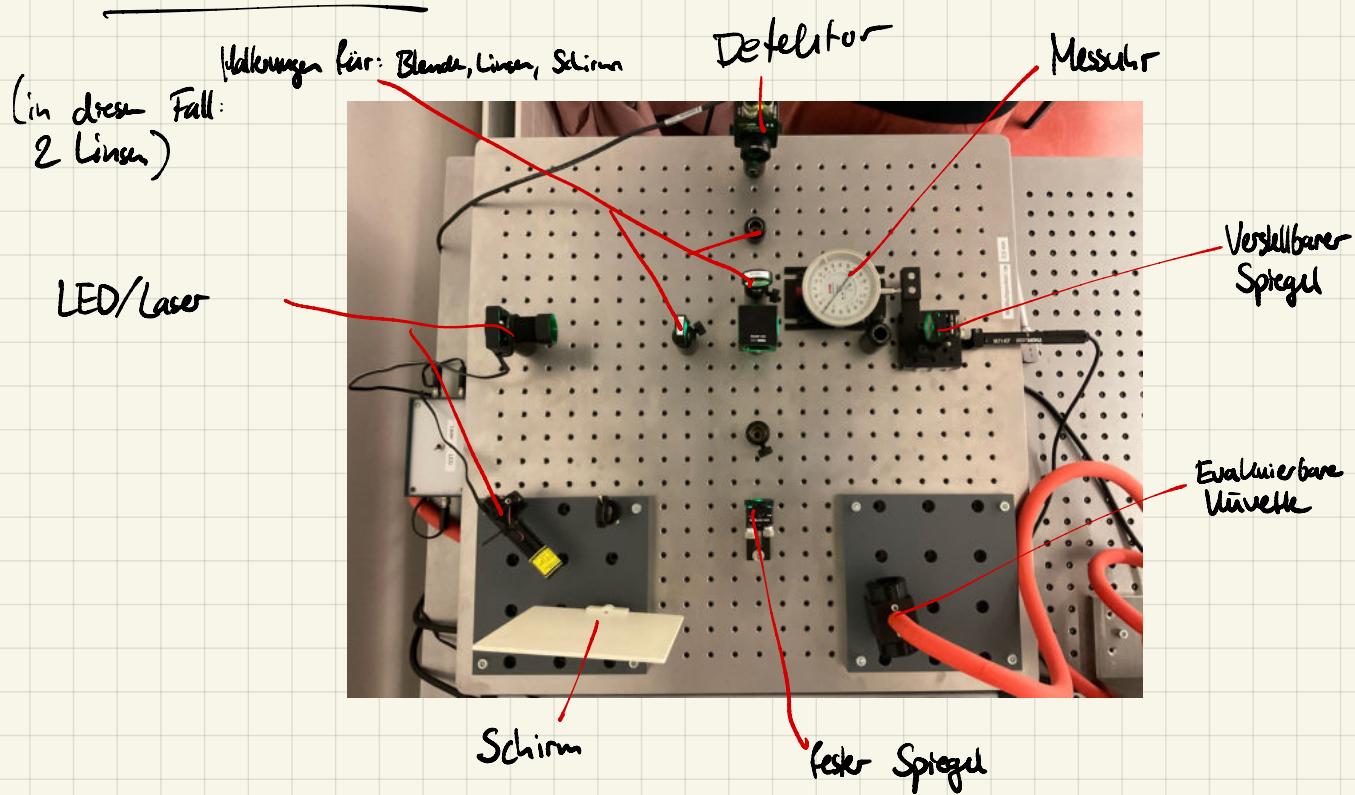
Messprotokoll Versuch 232

Victoria Hahn
Jan Kestling

26.11.21

- Geräte:
- Michelson Interferometer
 - Laser und Leuchtdiode
 - Thermometer
 - Vakuumpumpe

Versuchsaufbau:



Durchführung

1) Messung der Wellenlänge

Nachdem man das Interferometer justiert hat, wird der feste Spiegel so verstellt, sodass 2 bis 3 Interferenzringe auf dem Schirm zu sehen sind. Anschließend wird das Oszilloskop so angeschlossen, so dass man hier die Interferenzmaxima beobachten kann.

Mit der Messuhr wird nun die Startposition des Spiegels so aufgenommen, woraufhin dieser verschoben wird.

Auch die Endposition s_e und die Anzahl der Maxima werden notiert. Die Messung wird insgesamt fünfmal wiederholt.

Tabelle 1: Messung der Anzahl der Maxima im Abstand von ca. 3 mm

Messung	s_a [mm]	s_e [mm]	Anzahl Maxima m
1	0,0025	2,956	11073
2	0,022	2,977	11081
3	0,042	3,009	11132
4	0,074	3,039	11156
5	0,032	2,993	11026
Fehler Δ	$\pm 9 \text{ } \mu\text{m}$	$\pm 9 \text{ } \mu\text{m}$	Standardabweichung: $\pm 51,3$

2) Messung des Brechungsindexes für Luft

Nun wird vor dem festen Spiegel (Position 5) eine evakuierte Kuvette platziert und die Vakuumpumpe angeschaltet.

Sobald sich der Druck nicht mehr ändert wird die Vakuumpumpe wieder ausgeschaltet und mit dem Nadelventil nach und nach wieder Luft in die evakuierte Zelle gelassen.

Hierbei beobachtet man, wie im Zentrum immer mehr Interferenzringe erscheinen. Nach je 5 Ringen kann wir den Druck am Manometer ab. Insgesamt wird die Messung dreimal wiederholt.

Die Zimmertemperatur liegt bei: $T_z = (23,4 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Tabelle 2: Messung zur Bestimmung des Brechungsindexes ($[p] = \text{Torr}$) ($\Delta p = \pm 10 \text{ Torr}$)

Messung	1	2	3
p_0	710	720	720
p_5	635	645	645
p_{10}	550	575	570
p_{15}	470	500	495
p_{20}	395	425	425
p_{25}	325	350	350
p_{30}	250	280	280
p_{35}	175	205	200
p_{40}	100	130	125
p_{45}	30	55	55

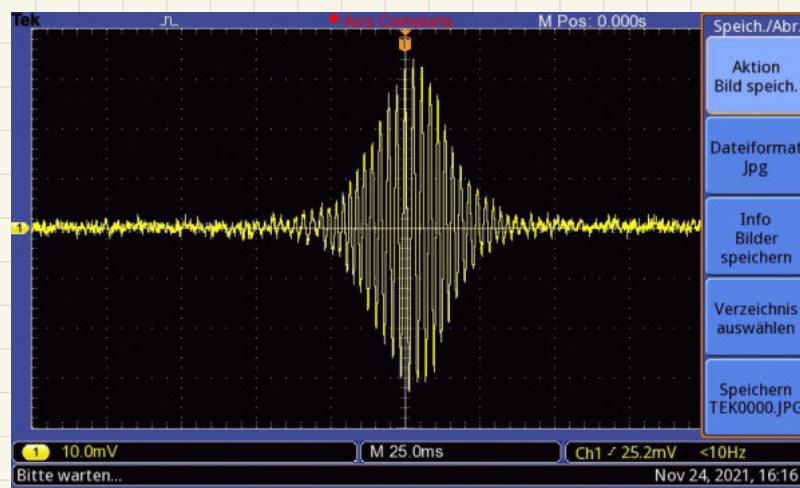
3) Messung der Wellenlängen einer Leuchtdiode

Für den letzten Teilversuch entfernt man die Klinette und tauscht den Laser mit einer Leuchtdiode aus. Das Oszilloskop wird im Single-Mode betrieben.

Der bewegliche Spiegel wird in Richtung des Strahlteilers bewegt bis die Weißlichtposition erreicht ist und das Oszilloskop ausschlägt.

Das Signal ist in Diagramm 1 aufgezeichnet.

Diagramm 1: Interferogramm der Leuchtdioden



24.11.21

D

3 Auswertung

Die Berechnungen der Auswertung finden in einem Python Skript und dementsprechendem Programm statt. Jenes ist im Anhang verzeichnet; in der Auswertung werden somit nur wesentliche Rechenwege und Ergebnisse angegeben. Außerdem werden alle Fehler nach der Fehlerfortpflanzung nach Gauß bestimmt und in trivialen oder unwesentlichen Fällen die Rechnung nicht angegeben; das Ergebnis nur endgültig präsentiert.

3.1 Bestimmung der Wellenlänge des grünen Lichts

Aus den Messdaten der Tabelle 1 (Messprotokoll) werden die Differenzen $s_{e_i} - s_{a_i}$ berechnet und davon der Mittelwert $\bar{\Delta}s$ zur weiteren Rechnung verwendet. Der Fehler setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\Delta\bar{\Delta}s = \sqrt{\sigma_{\bar{\Delta}s}^2 + 2 \cdot \Delta\Delta s} \quad (14)$$

Außerdem macht man das gleiche Verfahren mit den vorbeigezogenen Maxima m , nur ist hier kein Gerätefehler angegeben, also arbeitet man nur mit der Standartabweichung:

$$\bar{m} \equiv \bar{m} \pm \sigma_{\bar{m}} \quad (15)$$

Nun kann man alle gewonnenen Werte in (12) einsetzen und erhält:

$$\lambda = 2 \frac{\bar{s}}{\bar{m}} = \underline{(5,328 \pm 0,014) \cdot 10^{-7} \text{ m}} \quad (16)$$

3.2 Berechnung des Brechungsindex von Luft

Als Erstes trägt man die Werte aus Tabelle 2 in ein Diagramm auf:

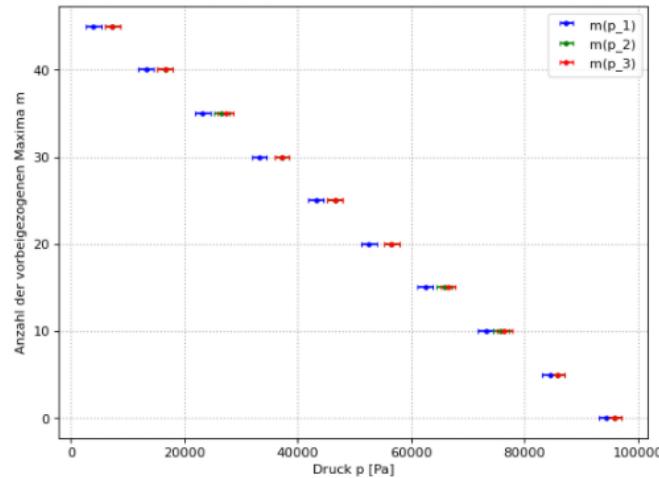


Diagramm 2: Vorbeigezogene Maxima als Funktion des Druckes

Und erstellt drei Ausgleichsgeraden mit jeweiliger Steigung q_i :

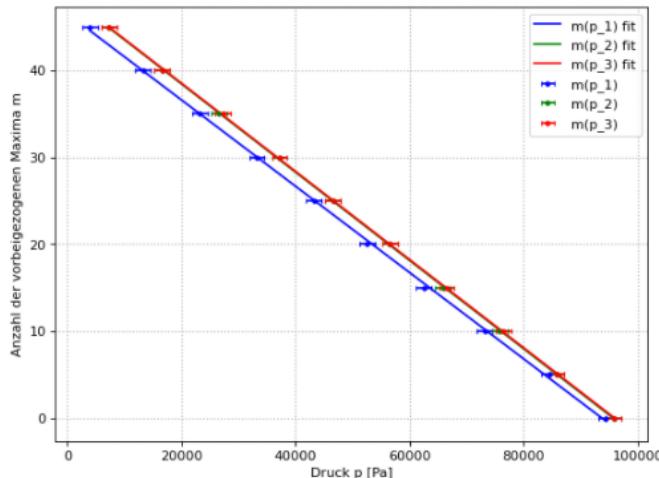


Diagramm 3: Vorbeigezogene Maxima als Funktion des Druckes mit Ausgleichsgerade

q_i und Δq_i werden mittels Pythoncommands ermittelt. Aus den drei Steigungen wird dann wiederum der Mittelwert \bar{q} , mit dem Fehler entsprechend der

Standartabweichung, genommen. Im Anschluss setzt man nun alle relevanten Werte in (13) ein und erhält für den Brechungsindex n_0 :

$$n_0 = \frac{\bar{q}\lambda p_0 T}{2aT_0} + 1 = \underline{\underline{1,000 \pm 0,008}} \quad (17)$$

Der Fehler hier errechnet sich mit folgenden Fehlerbehafteten Größen:

$$\Delta n_0 = n_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{s}}{\bar{s}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2} \quad (18)$$

3.3 Messung der Kohärenzlänge der Leuchtdiode

Zur bestimmung der Kohärenzlänge des verwendeten Lichts nimmt man sich das Interferogramm der Leuchtdiode:

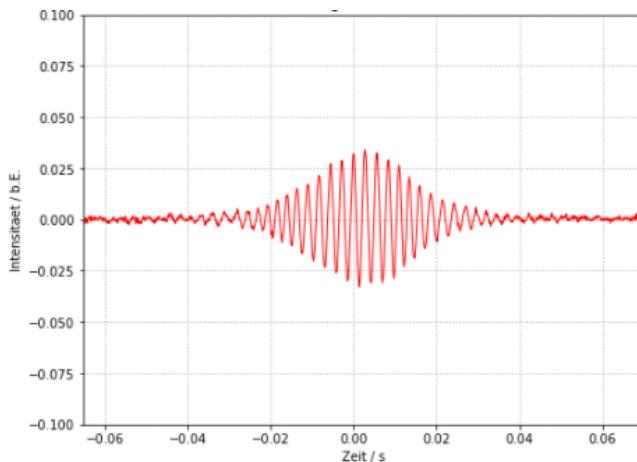


Diagramm 4: Interferogramm der Leuchtdiode (vgl. Diagramm 1)

Und ermittelt mithilfe von Python die gegebenen Maxima:

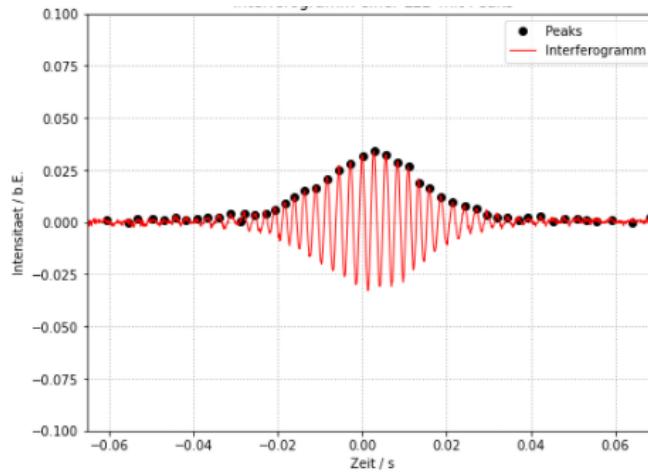


Diagramm 5: Peaks des Interferogramms (bestimmt mittels Python)

An die gefundenen Maxima fitted man nun eine Gaußkurve und lässt die σ -Breite (und deren Fehler) vom Programm ermitteln:

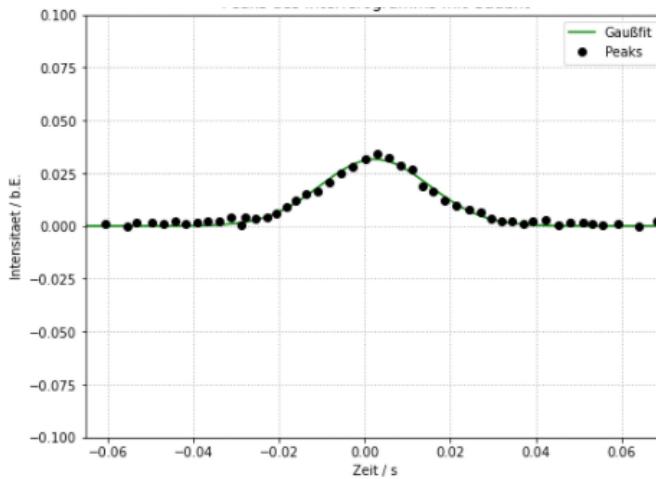


Diagramm 6: An die ermittelten Peaks gefittete Gaußkurve

Mit den gefundenen Werten setzt man nun in (7) ein und erhält für die Halbwertsbreite B_H :

$$B_H = 2\sqrt{2 \ln(2)}\sigma \quad \Delta B_H = 2\sqrt{2 \ln(2)}\Delta\sigma \quad (19)$$

Somit lässt sich nun die Kohärenzlänge L mittels dem im Skript gegebenen Wert für die Verfahrgeschwindigkeit $v = 0,0001 \text{ m/s}$ bestimmen:

$$L = B_H v = \underline{\underline{(3,00 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}}}$$
 (20)

3.4 Vergleich der ermittelten Werte

Überprüft man zuerst die ermittelte Wellenlänge λ des Lasers mit der im Skript angegebenen Wellenlänge λ_{lit} :

$$\sigma = \frac{|\lambda_{lit} - \lambda|}{\sqrt{\Delta\lambda_{lit}^2 + \Delta\lambda^2}} = \underline{\underline{0,50}}$$
 (21)

Zuletzt vergleicht man noch den Brechungsindex von Luft n_0 mit dem im Skript gelieferten Wert n_{0lit} :

$$\sigma = \frac{|n_{0lit} - n_0|}{\Delta n_0} = \underline{\underline{0,002}}$$
 (22)

Wichtig zu erwähnen ist, dass hier mit den exakten Ergebnissen gehandhabt wurde.

4 Zusammenfassung und Diskussion

4.1 Zusammenfassung

Zuerst haben wir, nachdem wir uns mit der Gerätschaft vertraut gemacht haben, durch Spiegelverschiebung und zeitgleichem Zählen der vorbeigezogenen Maxima die Messwerte bekommen, mit denen wir dann die Wellenlänge des grünen Laserlichts bestimmen konnten.

Als nächstes haben wir in einer evakuierbaren Küvette 3-Mal ein Unterdruck erzeugt und durch langsames Aufbauen des herrschenden Druckes und gleichzeitiges Abzählen der vorbeiziehenden Maxima die Werte bestimmt, mit denen man den Brechungsindex von Luft bei Normalbedingungen ermitteln konnte.

Zuletzt haben wir, nach langem Versuchen, es geschafft ein Interferogramm mit dem Oszilloskop aufzuzeichnen. Mittels dieses Diagramms ließ sich dann die Kohärenzlänge des verwendeten Lichts ermitteln.

4.2 Diskussion

All unsere Werte, bei welchen Literaturwerte gegeben waren, zeigen sehr geringen Abweichungen vom Literaturwert. Der Brechungsindex von Luft wurde mit einem sehr geringen Fehler (ca. 0,8%) sehr genau (σ -Abweichung von 0,002) bestimmt. Wir gehen also von einer Fehlerfreien Messreihe und Rechnung aus.

Auch das Laserlicht wurde nur mit einer σ -Abweichung von 0,5 sehr präzise Bestimmt. Wichtig im Hinterkopf zu behalten ist hier, dass auch ein Laser ein Frequenzspektrum emittiert und keine einzelne Wellenlänge.

Bei der Kohärenzlänge ist leider kein Literatur- bzw. Leuchtdiodenwert bekannt und leider war es nicht möglich die Peaks im Interferogramm genau bestimmen lassen, dennoch stimmt die Größenordnung des berechneten Ergebnisses mit der Größenordnung typische Kohärenzlängen mitein, also kann man auch hier von einem präzisem Ergebnis ausgehen. Somit kann man, in Anbetracht der sehr kleinen Abweichungen, auf jeden Fall von einem gelungenem Experiment sprechen.

5 Anhang

```
In [2]: # Messdaten
s_a = np.array([0.025, 0.022, 0.042, 0.074, 0.032]) * 10**(-3) #m
s_e = np.array([2.956, 2.977, 3.009, 3.039, 2.993]) * 10**(-3) #m
m = np.array([11073, 11081, 11132, 11156, 11026])
s_err_sys = 9 * 10**(-9) #m

# Mittelwerte und statistische Fehler:
delta_s = s_e - s_a
delta_s_mean = np.mean(delta_s)
delta_s_err_std = np.std(delta_s)/np.sqrt(5)
delta_s_err_sys = np.sqrt(s_err_sys**2 + s_err_sys**2)
delta_s_err = np.sqrt(delta_s_err_std**2 + delta_s_err_sys**2)

print("Delta s =",delta_s_mean,"+-",delta_s_err,"[m]")
print("Std Delta s:",delta_s_err_std,"[m]")
print("Sys Delta s:", delta_s_err_sys,"[m]")

m_mean = np.mean(m)
m_mean_err = np.std(m)/np.sqrt(5)
print("m =",m_mean,"+-",m_mean_err)

Delta s = 0.0029558 +- 5.840561788047461e-06 [m]
Std Delta s: 5.8405479195020865e-06 [m]
Sys Delta s: 1.2727922061357857e-08 [m]
m = 11093.6 +- 20.51458018093473

In [3]: # Berechnung der Wellenlänge Lambda:
lmbda = 2 * delta_s_mean / m_mean
lmbda_err = np.sqrt((2*delta_s_err / m_mean)**2 + (2*delta_s_mean * m_mean_err / (m_mean)**2)**2)
print("lambda=", lmbda, "+-", lmbda_err, "[m]")

lambda= 5.328838249080551e-07 +- 1.4421457535987462e-09 [m]

In [4]: # Abweichung vom Literaturwert
lmbda_lit = 532 * 10**(-9) #m
lmbda_lit_err = 1 * 10**(-9)
sigma_lmbda = np.abs(lmbda_lit - lmbda)/(np.sqrt(lmbda_err**2 + lmbda_lit_err**2))
print("Sigma Abweichung Wellenlänge:", sigma_lmbda)

Sigma Abweichung Wellenlänge: 0.5036236092663334
```

Abbildung 1: Pythonskript zum Abschnitt 3.1 und 3.4 (Vergleich λ)

```
In [5]: delta_m = np.linspace(0,45,10)
p1 = np.array([710, 635, 550, 470, 395, 325, 250, 175, 100, 30]) *133 #Pa
p2 = np.array([720, 645, 570, 495, 425, 350, 280, 200, 125, 55]) *133
p3 = np.array([720, 645, 575, 500, 425, 350, 280, 205, 125, 55]) *133
p_err = 10 *133

In [6]: plt.figure(figsize=(8, 6), dpi=80)
plt.title('Maximaanzahl als Funktion des Drucks')
plt.errorbar(p1, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="blue", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_1)")
plt.errorbar(p2, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="green", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_2)")
plt.errorbar(p3, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="red", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_3)")
plt.grid(linestyle=":", linewidth=1)
plt.legend()
plt.xlabel("Druck p [Pa]")
plt.ylabel("Anzahl der vorbeigezogenen Maxima m")

Out[6]: Text(0, 0.5, 'Anzahl der vorbeigezogenen Maxima m')
```

Maximaanzahl als Funktion des Drucks

Abbildung 2: Pythonskript zum Abschnitt 3.2; Messdaten und erstellen Diagramm 2

```
In [7]: def linear(x,q,b):
    return x*q + b
popt1, pcov1 = curve_fit(linear, p1, delta_m)
popt2, pcov2 = curve_fit(linear, p2, delta_m)
popt3, pcov3 = curve_fit(linear, p3, delta_m)

q1 = popt1[0]
q2 = popt2[0]
q3 = popt3[0]
q1_err = np.sqrt(pcov1[0,0])
q2_err = np.sqrt(pcov2[0,0])
q3_err = np.sqrt(pcov3[0,0])

b1 = popt1[1]
b2 = popt2[1]
b3 = popt3[1]

print("Steigung 1:", q1, "+-", q1_err, "[1/Pa]")
print("Steigung 2:", q2, "+-", q2_err, "[1/Pa]")
print("Steigung 3:", q3, "+-", q3_err, "[1/Pa]")

Steigung 1: -0.0004971968781533741 +- 3.842477651266644e-06 [1/Pa]
Steigung 2: -0.00050860450800985181 +- 1.7321797091008421e-06 [1/Pa]
Steigung 3: -0.0005079818467882637 +- 1.6899525081313712e-06 [1/Pa]

In [8]: plt.figure(figsize=(8, 6), dpi=80)
plt.title('Maximaanzahl als Funktion des Drucks - mit fit')
plt.errorbar(p1, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="blue", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_1) fit")
plt.plot(p1, linear(p1,q1,b1),label="m(p_1) fit",color="blue")
plt.errorbar(p2, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="green", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_2) fit")
plt.plot(p2, linear(p2,q2,b2),label="m(p_2) fit",color="green")
plt.errorbar(p3, delta_m, linestyle="None", marker = ".", color="red", xerr = p_err , capsizes = 2, label="m(p_3) fit")
plt.plot(p3, linear(p3,q3,b3),label="m(p_3) fit",color="red")
plt.grid(linestyle=":", linewidth=1)
plt.legend()
plt.xlabel("Druck p [Pa]")
plt.ylabel("Anzahl der vorbeigezogenen Maxima m")

Out[8]: Text(0, 0.5, 'Anzahl der vorbeigezogenen Maxima m')
```

Maximaanzahl als Funktion des Drucks - mit fit

Abbildung 3: Pythonskript zum Abschnitt 3.2; erstellen des Diagramms 3 und Bestimmung der einzelnen Steigungen

```
In [9]: q_mean = abs(np.mean(np.array([q1, q2, q3])))
q_mean_err_sys = np.mean(np.array([q1_err, q2_err, q3_err]))
q_mean_err_std = np.std(np.array([q1, q2, q3]))/np.sqrt(3)
q_mean_err = np.sqrt(q_mean_err_sys**2 + q_mean_err_std**2)

print("Mittlere Steigung:", q_mean, "+-", q_mean_err, "[1/Pa]")

p_0 = 101325
T_0 = 273.15
T = 23.8 + 273.15
T_err = 0.1
a = 0.05 #m
a_err = 0.00005 #m

n_0 = (q_mean * lmbda * p_0 * T) / (2 * a * T_0) + 1
n_0_err = np.sqrt((T_err/T)**2 + (a_err/a)**2 + (q_mean_err/q_mean)**2 + (lmbda_err/lmbda)**2) * n_0

print("Brechungsindex:", n_0, "+-", n_0_err)

n_0_lit = 1.00028
sigma_n_0 = (n_0 - n_0_lit)/(n_0_err)

print("Sigma-Abweichung n:", sigma_n_0)
```

Mittlere Steigung: 0.0005045944110133852 +- 3.873752875068e-06 [1/Pa]
 Brechungsindex: 1.000296192263738 +- 0.008210552467672747
 Sigma-Abweichung n: 0.001972128404463503

Abbildung 4: Pythonskript zum Abschnitt 3.2 (Berechnung des Brechungsin dex) und 3.4 (Vergleich der Brechungssindizes)

```
In [10]: data=np.genfromtxt("C:/Users/Jan A. Kesting/Documents/Kohärenzlänge einer Leuchtdiode.csv",delimiter=",",skip_header=18)
print(data)

t=data[:,3:4] # 4. Spalte ausschneiden
t=t[:, 0] # in 1D array wandeln
U=data[:,4:5] # 5. Spalte ausschneiden
U=U[:, 0] # in 1D array wandeln
```

[nan	nan	nan	-0.1232	-0.0004	nan]
[nan	nan	nan	-0.1231	0.0016	nan]
[nan	nan	nan	-0.123	0.0008	nan]
...						
[nan	nan	nan	0.1247	0.0004	nan]
[nan	nan	nan	0.1248	0.0004	nan]
[nan	nan	nan	0.1249	-0.0008	nan]

```
In [11]: plt.figure(figsize=(8,6))
plt.plot(t,U, color='red', linewidth=1)
plt.xlabel('Zeit / s')
plt.ylabel('Intensität / b.E.')
plt.title('Interferogramm einer LED')
plt.axis([-0.065, 0.07, -0.1, 0.1])
plt.grid(linestyle=":", linewidth=1)
```

Interferogramm einer LED

Abbildung 5: Pythonskript zum Abschnitt 3.3; importieren der Daten und erstellen des Diagrammes 4

```
In [12]: from scipy import signal
peakind = signal.find_peaks_cwt(U, np.arange(1,30),noise_perc=20)

In [13]: plt.figure(figsize=(8,6))
plt.plot(t[peakind], U[peakind],marker='o', linewidth=0, label="Peaks", color="Black")
plt.plot(t,U, color='red', linewidth=1, label="Interferogramm")
plt.xlabel('Zeit / s')
plt.ylabel('Intensitaet / b.E.')
plt.title('Interferogramm einer LED mit Peaks')
plt.axis([-0.065, 0.07, -0.1, 0.1])
plt.legend()
plt.grid(linestyle=":", linewidth=1)
```

Interferogramm einer LED mit Peaks

Abbildung 6: Python Skript zum Abschnitt 3.3; erstellen des Diagrammes 5

```
In [14]: #Fitfunktion Gauss
def fitFunc(t, a, mu, sig):
    return a/np.sqrt(2*np.pi)/sig*np.exp(-(t-mu)**2/(2*sig**2))

popt4, pcov4= curve_fit(fitFunc, t[peakind], U[peakind])
print("Sigma-Breite:", abs(popt4[2]), "+-", np.sqrt(pcov4[2,2]), "[s]")

x=np.linspace(-0.08,0.1,100) #x-Werte fuer die Fitfunktion

plt.figure(figsize=(8,6))
plt.plot(x, fitFunc(x, *popt4), color="green",label="Gaußfit")
plt.plot(t[peakind], U[peakind],marker='o', linewidth=0, color="Black", label="Peaks")
plt.xlabel('Zeit / s')
plt.ylabel('Intensitaet / b.E.')
plt.title('Peaks des Interferogramms mit Gaußfit')
plt.axis([-0.065, 0.07, -0.1, 0.1])
#plt.savefig('interferogramm_3.pdf',format='pdf')
plt.legend()
plt.grid(linestyle=":", linewidth=1)
```

Sigma-Breite: 0.012720047353870554 +- 0.00026554068511636954 [s]

Peaks des Interferogramms mit Gaußfit

Abbildung 7: Python Skript zum Abschnitt 3.3; berechnen der σ -Breite und erstellen des Diagrammes 6

```
In [16]: v = 0.0001 #m/s
sigma_k = abs(popt4[2])
sigma_k_err = np.sqrt(pcov4[2,2])

halbwertsbreite = 2 * np.sqrt(2*np.log(2))*sigma_k
halbwertsbreite_err = 2 * np.sqrt(2*np.log(2)) * sigma_k_err

print("Halbwertsbreite:", halbwertsbreite, "+-", halbwertsbreite_err, "[s]")

l_k = halbwertsbreite * v
l_k_err = halbwertsbreite_err * v

print("Kohärenzlänge:", l_k, "+-", l_k_err, "[m]")

sigma_k: 0.012720047353870554 +- 0.00026554068511636954
Halbwertsbreite: 0.029953422482637267 +- 0.0006253005280832785 [s]
Kohärenzlänge: 2.995342248263727e-06 +- 6.253005280832785e-08 [m]
```

Abbildung 8: Pythonskript zum Abschnitt 3.3; berechnung der Halbwertsbreite B_H und Kohärenzlänge L