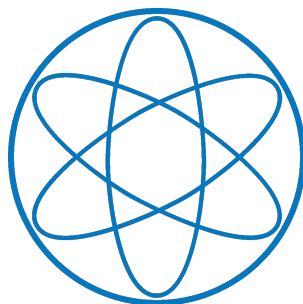


Anfängerpraktikum Teil 3

(Optik und Atomphysik)

Interferometrie



Block B, Kurs 3, Gruppe 1, Team 2:

Eduard Dolhescu*

Eduard Koller

Michael Labenbacher

Fakultät für Physik

Technische Universität München

1. Einleitung	1
2. Verwendete Methoden	1
2.1. Grundlagen	1
2.1.1. Kohärenz	1
2.1.2. Optische Weglänge	1
2.1.3. Interferenz	2
2.2. Michelson-Interferometer	2
2.2.1. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung	3
2.2.2. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft	3
2.2.3. Brechungsindex einer Plexiglasplatte	3
3. Experimentelles Vorgehen	4
3.1. Justierung des Interferometers	4
3.2. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung	4
3.3. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft	4
3.4. Brechungsindex einer Plexiglasplatte	4
4. Auswertung der Messergebnisse	5
4.1. Fehlerbetrachtung	5
4.2. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung	5
4.3. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft	6
4.4. Brechungsindex einer Plexiglasplatte	6
5. Diskussion	7

*Block B, Kurs 3, Gruppe 1, Team 1

Anhang	8
A. Messwerte und Fehlerrechnung	8
A.1. Ganghöhe	8
A.2. Druckabhängiger Brechungsindex der Luft	8
A.3. Plexiglasplatte	9
B. Literaturverzeichnis	12

1. Einleitung

In diesem Versuch wird die Interferenz zwischen elektromagnetischen Wellen ausgenutzt, um die Ganghöhe der Verstellerschraube der Spiegelverstellung bei einem Michelson-Interferometer und die Brechungsindizes von Luft und Plexiglas zu bestimmen. Die Messwerte und Fehlerrechnungen sind dem Anhang zu entnehmen.

2. Verwendete Methoden

2.1. Grundlagen

2.1.1. Kohärenz

Als Interferenz bezeichnet man die Überlagerung von Wellen und für die Beobachtung von stationären Interferenzbildern, muss eine konstante Phasenbeziehung zwischen den Wellen bestehen, was als Kohärenz bezeichnet wird. Man fordert, dass sich die Phasen φ_k zweier Wellen um weniger als 2π unterscheiden

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \leq 2\pi. \quad (2.1)$$

Die räumliche Phasenverschiebung einer Welle muss dabei innerhalb der Beobachtungszeit kleiner 2π sein, als Kohärenzzeit Δt_c wird die Zeit bezeichnet, in der sich diese Phase zweier Wellen um 2π ändert und die Kohärenzlänge Δl_c ist der maximale Gangunterschied dieser Wellen. Es gelten die Zusammenhänge

$$\Delta t_c = \frac{1}{\Delta f} \quad \Delta l_c = c\Delta t_c, \quad (2.2)$$

und wegen der Unschärferelation hat die Frequenz f natürlicher Lichtquellen eine endliche Breite. Damit ist die Kohärenzzeit und das Kohärenzvolumen (Kohärenzlänge multipliziert mit der Kohärenzfläche, wo die räumliche Differenz einer Phase einer Teilwelle Null ist) beschränkt. Innerhalb dieses Volumens ist Interferenz möglich und außerhalb sinkt der Kontrast, bis keine stationären Interferenzbilder mehr beobachtbar sind.

2.1.2. Optische Weglänge

Die optischen Weglänge

$$\Delta s = \int_{A,\gamma}^B n(\vec{x}) \, dl, \quad (2.3)$$

entspricht dem geometrischen Weg γ von A nach B multipliziert mit dem Brechungsindex n des Mediums und es ergibt sich für das Michelson-Interferometer die Bedingung

$$\Delta s \leq \Delta l_c. \quad (2.4)$$

2.1.3. Interferenz

Für die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zweier Strahlen gilt

$$\Delta\varphi = k \cdot \Delta s \quad \text{mit } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

mit dem Wellenvektor k und der Dispersionsrelation

$$k = \frac{n\omega}{c}, \quad (2.6)$$

dem Zusammenhang von Wellenlänge, Frequenz f ($\omega = 2\pi f$), Lichtgeschwindigkeit c und Brechungsindex. Destruktive bzw. konstruktive Interferenz (minimale bzw. maximale Intensität) beobachtet man für

$$\text{konstruktiv: } \Delta\varphi = 2m\pi \quad \text{destruktiv: } \Delta\varphi = (2m + 1)\pi \quad \text{bzw.} \quad (2.7)$$

$$\text{konstruktiv: } \Delta s = m\lambda \quad \text{destruktiv: } \Delta s = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad (2.8)$$

mit $m \in \mathbb{Z}$. Interferenzbilder können z. B. durch Variation des optischen Weges eines Strahls, also der Phasenbeziehung zueinander, verändert werden. Aus diesen Gründen eignet sich für die Beobachtung von Interferenz ein Laser, welcher eine hohe Kohärenzlänge besitzt und annähernd monochromatisches Licht erzeugt.

2.2. Michelson-Interferometer

Im einfachsten Fall besteht ein Michelson-Interferometer, siehe Abbildung 2.1, aus einer Lichtquelle (Laser), einem halbdurchlässigen Spiegel als Strahlteiler, zwei Spiegeln, wobei einer verschiebbar ist, und einem Schirm bzw. Detektor. Das einfallende Laserlicht trifft im 45°-Winkel auf den Strahlteiler, die Teilstrahlen werden an den Spiegeln reflektiert und gelangen über den Strahlteiler auf den Schirm (und zurück zur Quelle). Am Schirm interferieren die beiden Strahlen und auf Grund von minimaler Divergenz der Lichtstrahlen sind Interferenzringe mit maximaler Helligkeit bei konstruktiver, bzw. minimaler bei destruktiver Interferenz beobachtbar. Variation des Interferenzmusters kann durch Änderung des optischen Weges eines Strahles erreicht werden.

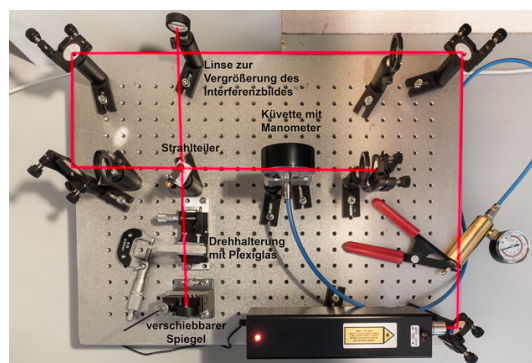


Abbildung 2.1.: Michelson-Interferometer mit Strahlverlauf, -teiler, Laser und verwendete Gegenstände (Küvette, Plexiglas, verschiebbarer Spiegel) zur Änderung des optischen Weges eines Strahls. [1]

2.2.1. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung

Eine Verschiebung eines Spiegels um Δz beim Michelson-Interferometer ändert die für diesen Strahl geometrische, zusätzliche Weglänge um den Beitrag $2\Delta z$. Mit einem Brechungsindex von Luft $n \approx 1$, m der Anzahl an Interferenzdurchgängen während der Verschiebung des Spiegels und mit Gleichung (2.3) folgt $2\Delta z = m\lambda$. Für die Ganghöhe G einer Umdrehung und bei s gemessenen Skaleneinheiten der Mikrometerschraube ergibt sich

$$G = \frac{s_m}{s} \cdot \Delta z = \frac{s_m}{s} \cdot \frac{m\lambda}{2} \quad (2.9)$$

mit s_m der Anzahl an Skaleneinheiten pro Umdrehung.

2.2.2. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft

Für die optische Weglängendifferenz zweier Teilstrahlen beim Michelson-Interferometer bei konstruktiver Interferenz unter Verwendung einer Gasküvette der Länge l parallel zu einem Strahl, siehe Abbildung 2.1, folgt

$$\Delta s = m\lambda = 2l \cdot (n(p) - n_0), \quad (2.10)$$

mit n_0 dem Brechungsindex bei Umgebungsdruck p_0 für den ersten Strahl, $n(p)$ beim Druck p in der Gasküvette beim zweiten Strahl und m ist die Ordnung des am Schirm beobachteten Interferenzmaximas. Es folgt

$$\lambda = 2l \cdot \frac{dp}{dm} \frac{dn}{dp}$$

durch Ableitung nach m von Gleichung (2.10). Mit der Annahme einer konstanten Druckänderung $dp/dm = \chi$ und mit $n = 1$ bei $p = 0$ im Vakuum folgt per Integration

$$n = 1 + \frac{\lambda}{2l\chi} \cdot p \quad (2.11)$$

ein linearer Zusammenhang vom Brechungsindex und Gasdruck.

2.2.3. Brechungsindex einer Plexiglasplatte

Bringt man in einem Teilstrahl des Interferometers eine Plexiglasplatte der Dicke d im Winkel α relativ zum Strahlengang, so kann die zusätzliche optische Weglänge für diesen Strahl nach

$$\Delta s = N\lambda = 2d \cdot \left(1 - n - \cos(\alpha) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)}\right) \quad (2.12)$$

berechnet werden. Dabei ist n der Brechungsindex des Plexiglasses, für Luft wurde $n_{\text{Luft}} \approx 1$ angenommen, N ist die Anzahl der am Schirm verstrichenen Interferenzringe relativ zur Nullposition ($\alpha = 0$) und eine Herleitung der Formel (2.12) findet sich in Abschnitt A.3.

3. Experimentelles Vorgehen

3.1. Justierung des Interferometers

Nach Aufbau des Systems in Abbildung 2.1 mit einem Laser der Wellenlänge $\lambda = 633\text{ nm}$ ist die Justierung vor zu nehmen. Zunächst wird der Laserstrahl mit mehreren Spiegeln, zur einfacheren Variation des Strahls, auf den Strahlteiler gelenkt und im Anschluss durch Feineinstellung der Spiegel wird am Schirm ein gut erkennbares Interferenzmuster, vergrößert durch eine Linse, sichtbar gemacht.

3.2. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung

Mit dem verschiebbaren Spiegel beim Michelson-Interferometer kann die Weglänge eines Teilstrahles mit einer Mikrometerschraube, deren Ganghöhe gesucht ist, variiert werden. Dafür sind die Skaleneinheiten zu bestimmen, um die die Schraube gedreht werden muss, um $m = 100$ Maxima- oder Minimadurchgänge am Schirm beobachten zu können. Am Beginn ist eine Referenzstellung der Schraube fest zu legen und nach Durchführung der relative Unterschied in Skalenteilen zum Referenzpunkt zu messen. Die Messung ist von jedem Versuchsteilnehmer zwei bis drei mal durch zu führen (insgesamt sieben mal) und mit Gleichung (2.9) folgt die Ganghöhe der Verstellschraube.

3.3. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft

Im zweiten Teil wird eine Gasküvette in einen der beiden Lichtstrahlen des Interferometers platziert. Mit einer Handpumpe kann der Druck in der Küvette verändert werden und ein Barometer dient zur Messung. Am Beginn wird der Druckunterschied auf ein Maximum erhöht (ca. 0.8 bar), da die Küvette nicht zu 100 % dicht ist sinkt der Druck mit der Zeit ab und ablesen nach je drei Interferenzdurchgängen (Minima) führt auf den Druck p in Abhängigkeit von der Anzahl der verstrichenen Interferenzdurchgängen m . Der Messprozess ist drei mal zu wiederholen und die Länge der Gasküvette mit einem Messschieber zu messen.

3.4. Brechungsindex einer Plexiglasplatte

In diesem Abschnitt wird eine Plexiglasplatte in einen der Wege der Teilstrahlen auf einem Drehteller positioniert. Am Beginn ist das Glas orthogonal zum Lichtweg auszurichten. Dabei ist die Mikrometerschraube zur Änderung des Winkels (bzw. der Ganghöhe x , im Folgenden als Gegenkathete bezeichnet) so einzustellen, dass die Interferenzdurchgänge stehen bleiben und einen Umkehrpunkt erreichen. Dreimaliges wiederholen und Mittelwertbildung führt auf die zu verwendende orthogonale Stellung als Referenzwert ($N = 0$). Im Anschluss darauf ist der Winkel zu verändern und bei jeweils drei Wiederholungen des Interferenzbildes bei der Referenzstellung ist die Ganghöhe (und somit der Winkel) der Mikrometerschraube zu erfassen. Bei kleinen Winkeln bis $N = 3$ ist nach einmaliger Wiederholung des Interferenzbildes die Länge x zu messen. Dieser Prozess ist in beide Drehrichtungen bis zur maximalen Ordnung (hier $N = 42$ bzw. $N = 36$) durchzuführen. Abschließend ist die Dicke der Platte mit einer Mikrometerschraube und die Entfernung zum Drehpunkt l (im Folgenden als Ankathete bezeichnet) mit einem Messschieber zu bestimmen. Es gilt der geometrische Zusammenhang

$\tan(\beta) = x/l$ und um auf den Winkel α zu gelangen ist der Winkel des Referenzpunktes β_0 ab zu ziehen, also $\alpha = \beta - \beta_0$.

4. Auswertung der Messergebnisse

4.1. Fehlerbetrachtung

Der systematische Fehler der Wellenlänge λ des verwendeten Lasers wird im Verhältnis zu den statistischen auftretenden Abweichungen in den Messprozessen als gering angenommen. Fehlerfortpflanzungen und -rechnungen sind dem Anhang A zu entnehmen.

Bei der Ganghöhenbestimmung folgt der statistische Fehler der Skalenteilmessung s aus der Standardabweichung und Student-t-Verteilung ($t_{\text{Student}} = 1.095$ bei $n = 7$) und der systematische wurde mit einer Genauigkeit der Skala auf der Mikrometerschraube mit 0.1 % „Mittelwert“ abgeschätzt. Messung der Dicke des Plexiglasses, Länge des Abstandes zum Drehpunkt und der Plexiglasplatte, Referenzpunkterfassung bei der Bestimmung des Brechungsindex des Plexiglasses und Länge der Gasküvette wurden drei mal wiederholt und im Anschluss liefert die Standardabweichung und Student-t-Verteilung ($t_{\text{Student}} = 1.32$ bei $n = 3$) die statistische Abweichung. Messungen mit Mikrometerschrauben haben einen systematischen Fehler von 0.01 mm, bei dem Messschieber 0.05 mm und Nullpunktfehler waren nicht erkennbar. Für die Gasküvette wurde zusätzlich eine systematische Abweichung von 0.1 mm berücksichtigt, um einen nicht exakt parallelen Einbau beim Michelson-Interferometer mitzuberücksichtigen. Die einzelnen Längenmessungen sind dem Messprotokoll zu entnehmen.

Für die Messung des Drucks beim Michelson-Interferometer wurde eine Ablesegenauigkeit von $\Delta p_{\text{stat}} = 0.0025$ bar eingeplant und zusätzliche statistische Abweichungen von 0.005 bar, auf Grund des optischen Empfindens, wann der nächste Interferenzdurchgang vorliegt. Systematische Abweichungen (Barometer KI 1.6 %) sind auf Grund der relativ hohen statistischen und der Differenzbildung der Messwerte vernachlässigbar.

Beim Luftdruck p wurde der Messwert des meteorologischen Institutes in Garching verwendet, wobei der Mittelwert in der Praktikumszeit gebildet ($\Delta p_{\text{stat}} = 200$ Pa) und eine systematische Abweichung von 150 Pa geschätzt wurde.

4.2. Ganghöhe der Verstellschraube der Spiegelverstellung

Als Referenzpunkt wurde die Skalenstellung bei Null gewählt und die Ergebnisse der Messungen ohne Überlauf befinden sich in Tabelle A.1. Die mittlere gemessene Skaleneinheit (Skt) beläuft sich auf $s = (34.64 \pm 0.03)$ Skt und mit Gleichung (2.9), $m = 100$ und $s_m = 50$ Skt folgt die Ganghöhe zu

$$G = (45.7 \pm 0.8) \mu\text{m}. \quad (4.1)$$

4.3. Druckabhängiger Brechungsindex von Luft

Die effektive Länge der Gasküvette beträgt $l = (49.73 \pm 0.17)$ mm und der Luftdruck in Gar-ching $p = (0.960 \pm 0.004)$ bar [2]. Nach dem linearen Fit in Abbildung 4.1 mit den Messwerten in Abschnitt A.2 folgt über Gleichung (2.11) der Brechungsindex von Luft

$$n = 1.000\,260\,5(25)$$

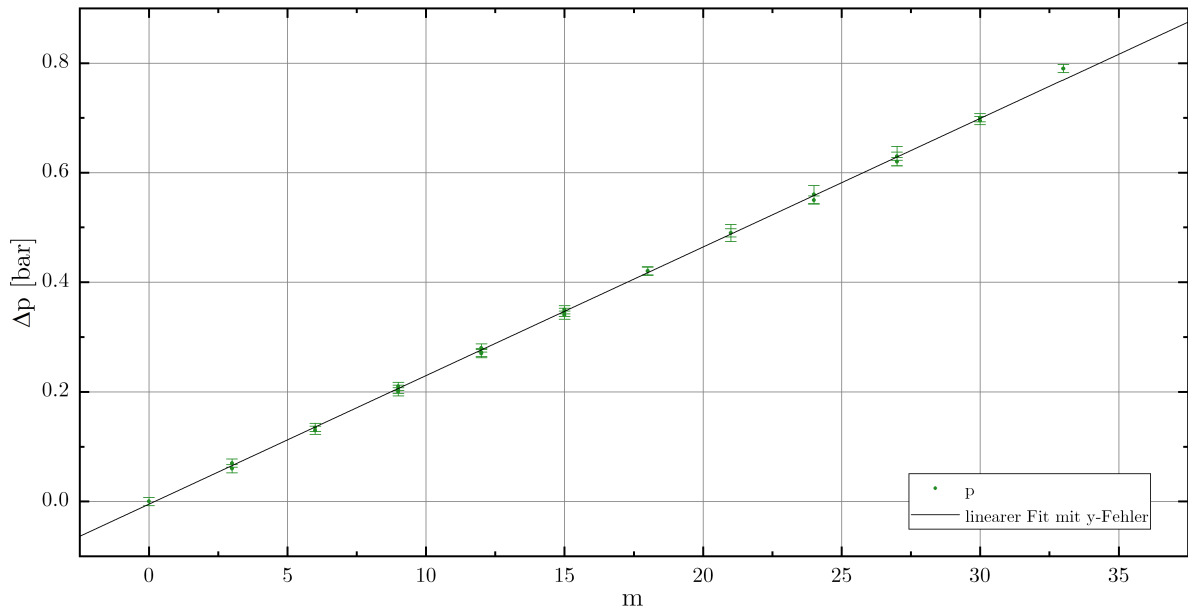


Abbildung 4.1.: Druck in der Küvette bezogen auf den jeweiligen Anfangswert bei ca. 0.8 bar über die verstrichen Interferenzdurchgänge m . Linearer Fit mit drei Messreihen liefert eine Steigung von $\chi = (0.023\,46 \pm 0.000\,10)$ bar und y-Achsenabschnitt $(-0.004\,8 \pm 0.001\,7)$ bar und die Annahme einer lineare Druckänderung kann als gerechtfertigt angesehen werden.

4.4. Brechungsindex einer Plexiglasplatte

Die Messwerte der Winkel β bei verschiedenen Interferenzlagen N ist der Tabelle A.4 zu entnehmen und der Referenzwinkel beläuft sich auf im Mittel $\beta_0 = 7.93^\circ$, bei einer Stellung der Mikrometerschraube $x = (6.36 \pm 0.03)$ mm und einem Abstand des Plexiglases zum Drehpunkt $l = (45.65 \pm 0.11)$ mm. Mit der Dicke des Glases $d = (10.377 \pm 0.014)$ mm und nach anschließendem Fit, mit Mittelwert d in Abbildung 4.2 dargestellt, folgt ein Brechungsindex

$$n = 1.491\,7 \pm 0.001\,6$$

Fit-Anpassung und -Parameter sind dem Anhang A.3 zu entnehmen.

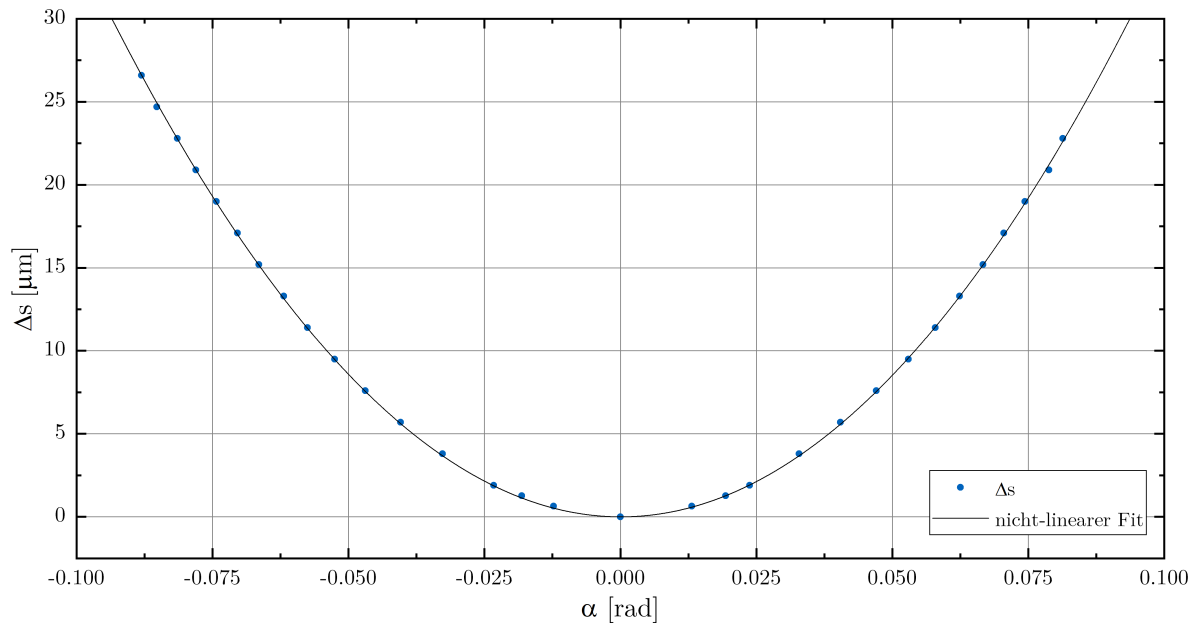


Abbildung 4.2.: Optische Weglängendifferenz $\Delta s = N\lambda$ in Abhängigkeit vom Winkel α . Bei $\alpha = 0$ befindet sich die Plexiglasplatte senkrecht zum Lichtstrahl. Nicht-linearer Fit nach Gleichung (2.12) mit Transformation $\alpha \rightarrow \alpha + \xi$ zur Elimination von systematischen Abweichungen und $2d$ als konstantem Parameter (Mittelwert).

5. Diskussion

Ein Vergleich zum Brechungsindex in der Luft bei Normbedingungen (trockene Luft auf Meereshöhe, $\lambda = 589 \text{ nm}$) $n = 1.00028$ [3] und dem exponentiellen Abfall von n mit steigender Höhe zeigt, dass der berechnete Brechungsindex in Abschnitt 4.3 in einem realistischen Bereich liegt.

Der Brechungsindex von Plexiglas beträgt $n = 1.49$ [4], wobei Abweichungen einerseits dadurch erklärt werden können, dass die genaue verwendete Glassorte, sowie Fertigungstoleranz und theoretische Wellenlänge für $n = 1.49$ unbekannt ist und andererseits lediglich eine Messreihe durchgeführt wurde, wobei systematische Abweichungen bei der Winkelmessung durch den Fit weitgehendst unterdrückt wurden. In Abbildung 4.2 lässt sich ein symmetrischer Verlauf der Datenpunkte um die Referenzlage, wie von der Formel (2.12) verlangt, erkennen, wobei in einer Richtung weniger Interferenzdurchgänge aufgenommen werden konnten, da das Interferenzbild ab dort konstant geblieben ist.

A. Messwerte und Fehlerrechnung

A.1. Ganghöhe

Tabelle A.1.: Messwerte der Skaleneinheiten zur Bestimmung der Ganghöhe der Verstell-
schraube der Spiegelverstellung.

Messung	1	2	3	4	5	6	7
Differenz zu Ref. [Skt]	35.50	34.50	37.25	34.50	34.00	34.25	32.50

A.2. Druckabhängiger Brechungsindex der Luft

Die Fehlerfortpflanzung auf den Brechungsindex nach Gleichung (2.11) liefert mit $\chi = dp/dm$

$$\Delta n_{\text{stat}} = \frac{p\lambda}{2l\chi} \sqrt{\left(\frac{\Delta p_{\text{stat}}}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_{\text{stat}}}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \chi_{\text{stat}}}{\chi}\right)^2}$$

$$\Delta n_{\text{syst}} = \left| \frac{p\lambda}{2l\chi} \right| \left(\left| \frac{\Delta p_{\text{syst}}}{p} \right| + \left| \frac{\Delta l_{\text{syst}}}{l} \right| \right)$$

Tabelle A.2.: Messwerte der Druckdifferenzen zum Umgebungsdruck für drei Messreihen
beginnend bei ca. 0.8 bar.

Messreihe	1	2	3
m	p bar	p bar	p bar
0	0.810	0.780	0.780
3	0.740	0.710	0.720
6	0.680	0.650	0.645
9	0.600	0.580	0.575
12	0.538	0.510	0.500
15	0.465	0.440	0.430
18	0.389	0.360	0.360
21	0.320	0.290	0.290
24	0.260	0.230	0.220
27	0.180	0.160	0.150
30	0.110	0.085	
33	0.020		

A.3. Plexiglasplatte

Für die Herleitung von (2.12) betrachte man die Abbildung A.1. Aus geometrischen Überlegungen $d = l \cos(\beta)$ und der Definition der optischen Weglänge (2.3) folgt

$$\Delta s = 2 \left(nd \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) + d - h \right)$$

Mit den Zusammenhängen

$$\cos(\alpha - \beta) = \frac{h}{l} = \frac{h}{d} \cos(\beta) \quad \text{also} \quad h = d \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos(\beta)} \quad \text{und}$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

und dem Snellius-Brechungsgesetz

$$\sin(\alpha) = n \sin(\beta) \tag{A.1}$$

mit $n_{\text{Luft}} \approx 1$ folgt

$$\Delta s = 2d \left(1 - \cos(\alpha) - n + \frac{n}{\cos(\beta)} - \frac{\sin^2(\alpha)}{n \cos(\beta)} \right) = 2d \left(1 - \cos(\alpha) - n + \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \right)$$

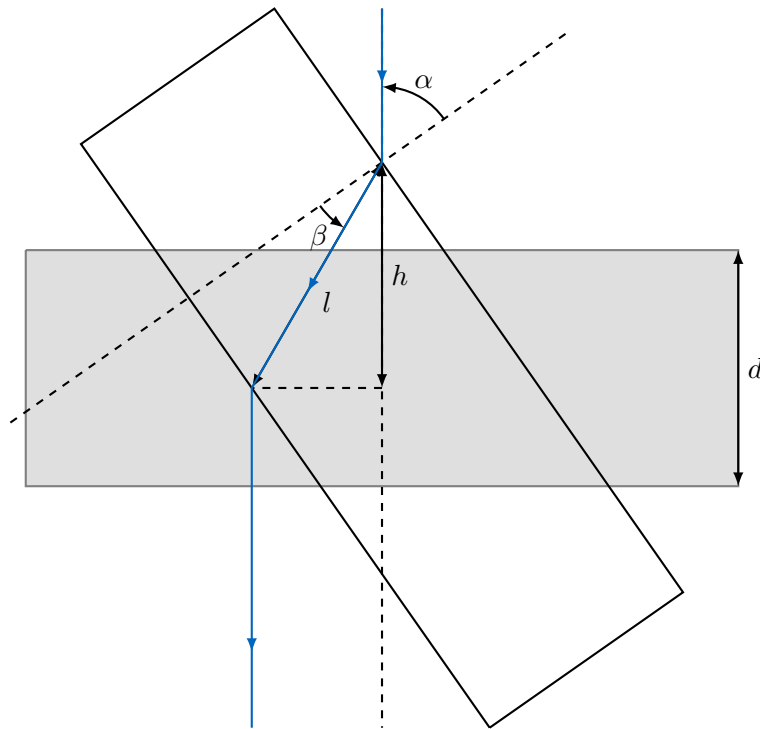


Abbildung A.1.: Durchgang des Lichts durch das Plexiglas bei Drehung um den Winkel α .

Da der systematische Fehler von der Messung der Dicke mit $10\text{ }\mu\text{m}$ überwiegt ($\Delta d_{\text{stat}} = 4.4\text{ }\mu\text{m}$) wurden zwei Fits mit maximalem und minimalen Wert $2d$ als konstanten Parameter und eine Maximalwertabschätzung des Fehlers durchgeführt.

Tabelle A.3.: Fit-Parameter der Fits $\Delta s = f(\alpha)$ mit $f(\alpha)$ nach Gleichung (2.12) und $\alpha \rightarrow \alpha + \xi$.

	n	Δn	ξ μrad	$\Delta\xi$ μrad
max $2d$	1.491 2	0.001 0	-90	50
min $2d$	1.492 2	0.001 0	-90	50

Tabelle A.4.: Messwerte der Stellungen der Mikrometerschraube x bei den Interferenzlagen N und daraus berechnete Winkeln und optische Weglängen.

N	x mm	β $^\circ$	α $^\circ$	Δs μm
0	6.360 0	0.138	0	0
1	6.972 5	0.152	0.013	0.63
2	7.262 5	0.158	0.019	1.27
3	7.470 0	0.162	0.024	1.90
6	7.897 5	0.171	0.033	3.80
9	8.255 0	0.179	0.040	5.70
12	8.565 0	0.185	0.047	7.60
15	8.845 0	0.191	0.053	9.50
18	9.080 0	0.196	0.058	11.39
21	9.292 5	0.201	0.062	13.29
24	9.497 5	0.205	0.067	15.19
27	9.680 0	0.209	0.071	17.09
30	9.865 0	0.213	0.074	18.99
33	10.075 0	0.217	0.079	20.89
36	10.197 5	0.220	0.081	22.79
0	6.360 0	0.138	0	0
1	5.790 0	0.126	-0.012	0.63
2	5.517 5	0.120	-0.018	1.27
3	5.280 0	0.115	-0.023	1.90
6	4.845 0	0.106	-0.033	3.80
9	4.490 0	0.098	-0.040	5.70
12	4.190 0	0.092	-0.047	7.60
15	3.930 0	0.086	-0.053	9.50
18	3.700 0	0.081	-0.058	11.39
21	3.500 0	0.077	-0.062	13.29
24	3.290 0	0.072	-0.066	15.19
27	3.110 0	0.068	-0.070	17.09
30	2.932 5	0.064	-0.074	18.99

N	x mm	β °	α °	Δs µm
33	2.760 0	0.060	−0.078	20.89
36	2.602 5	0.057	−0.081	22.79
39	2.430 0	0.053	−0.085	24.69
42	2.302 5	0.050	−0.088	26.59

B. Literaturverzeichnis

- [1] *Interferometrie (INT)*. 2019. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap3/> (besucht am 7. März 2019) (siehe S. 2).
- [2] *Messwerte des meteorologischen Instituts der LMU*. 2019. URL: <https://www.meteor.physik.uni-muenchen.de/DokuWiki/doku.php?id=wetter:garching:neu> (besucht am 7. März 2019) (siehe S. 6).
- [3] W.M. Haynes. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 96th Edition*. 100 Key Points. CRC Press, 2015. ISBN: 9781482260977 (siehe S. 7).
- [4] M. Fox. *Optische Eigenschaften von Festkörpern*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012. ISBN: 9783486712407 (siehe S. 7).