

4. Juli 2005

Kristalloptik

Gruppe 36

Simon Honc shonc@web.de	Christian Hütter Christian.huetter@gmx.de
-----------------------------------	-----------------------------------------------------



I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	2
II.	Theoretische Grundlagen	3
1.	Polarisation.....	3
2.	Doppelbrechung, Dichroismus.....	3
3.	Indikatrix	4
III.	Experimenteller Aufbau	5
IV.	Durchführung des Versuchs	6
	Aufgabe 1:	6
	a) Quarzkeil	6
	b) Gips, ungleich dick.....	6
	c) Plexiglasstab bei Belastung.....	7
	d) Zusätzliche Betrachtungen	7
	Aufgabe 2:	7
	Aufgabe 3:	8
	Aufgabe 4:	9
	a) Kalkspat, senkrecht zur optischen Achse geschnitten.....	9
	b) Quarz, senkrecht zur optischen Achse geschnitten	9
	c) Glimmer, senkrecht zur ersten Mittellinie geschnitten	10
	d) Topas, senkrecht zur ersten Mittellinie geschnitten	10
	e) sonstiges	10
	Aufgabe 5:	11

II. Theoretische Grundlagen

1. Polarisation

Im Gegensatz zu „natürlichem“ Licht z.B. Sonne, dessen \vec{E} bzw. dessen \vec{B} -Vektor alle Richtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung annehmen kann, schwingt bei linear polarisiertem Licht der \vec{E} -Vektor immer nur in eine Richtung. Bei elliptisch polarisiertem Licht beschreibt der \vec{E} -Vektor eine Ellipse (als Spezialfall einen Kreis bei zirkular polarisiertem Licht). Eine elliptisch oder zirkular polarisierte Welle kann man in zwei zueinander senkrecht schwingende linear polarisierte Wellen mit der Phasendifferenz zwischen 0 und $\frac{\pi}{2}$ zerlegen.

Zur Erzeugung von polarisiertem Licht kann Sonnenlicht (oder anderes unpolarisiertes Licht) verwendet man einen Polarisator. Diese bestehen meist aus lang gezogenen Kunststoffmolekülen, die parallel angeordnet sind und dadurch nur Licht einer Polarisationsrichtung durchlassen.

Eine andere Möglichkeit ist eine Polarisation durch Reflexion an dem so genannten Brewsterwinkel. Des Weiteren kann Licht auch durch Streuung (Reyleigh-Streuung) und Doppelbrechung polarisiert werden, oder mit einem Laser schon polarisiert erzeugt werden.

2. Doppelbrechung, Dichroismus

Unter Doppelbrechung versteht man die Aufspaltung eines Lichtstrahls in einem ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl beim Eindringen in den Kristall.

Dies ist einfach zu verstehen, wenn man den Lichtstrahl als zwei senkrecht zueinander schwingende linear polarisierte Wellen auffasst.

Aufgrund der verschiedenen Brechungsindizes in den verschiedenen Raumrichtungen des

Kristalls wird der Strahl nun in zwei verschiedene Richtungen gebrochen. (Snellius Brechungsgesetz: $\frac{\sin \epsilon'}{\sin \epsilon} = \frac{n_e/o}{n_L}$, n_L : Brechungsindex außerhalb des Kristalls)



Abbildung 1: Doppelbrechung

Man kann die Brechungsindizes wie folgt definieren: $n_e = \frac{c}{v_{\parallel}}$, $n_o = \frac{c}{v_{\perp}}$

Ein anderes Phänomen der Doppelbrechung ist der Dichroismus. Je nach dem, ob man die Polarisation des Lichtstrahl senkrecht oder parallel zu optischen Achse des Kristalls betrachtet, sind jetzt unterschiedliche Absorptionsverhalten festzustellen. Dies liegt daran, dass der Brechungsindex von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Je nach dem wie lang der Strahl (Dicke d) sich in den Materialien befindet, können also unterschiedliche Farben absorbiert werden. Für den Phasenunterschied Δl zwischen ordentlichen und außerordentlichen Strahl ergibt sich:

$$\Delta l = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n$$

3. Indikatrix

Wie gesehen hängt der Brechungsindex eines kristallinen Festkörpers von den Raumrichtungen ab. Wir führen deshalb den Dielektrizitätstensor ein, und transformieren ihn auf seine Hauptachsen:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

Die Brechungsindizes ergeben sich zu:

$$n_i = \sqrt{\varepsilon_i}, \quad i=1, 2, 3$$

Die Endpunkte des Vektors $\vec{n}=(n_x, n_y, n_z)$ im Hauptachsensystem lassen sich dann geometrisch als Ellipsoiden darstellen.

Die Schnittebenen der Indikatrix mit der Ebene, die durch den Wellenvektor \vec{k} des einfallenden Lichtstrahls aufgespannt wird, sind Ellipsen. Diese dienen als Konstruktionsflächen zur Bestimmung der Brechungsindizes. Im Spezialfall eines Kreises liegt \vec{k} auf einer optischen Achse. Man unterscheidet zudem noch zwischen optisch einachsigen ($n_1 = n_2 \neq n_3$) und zweiachsigen ($n_1 \neq n_2 \neq n_3$) Kristallen.

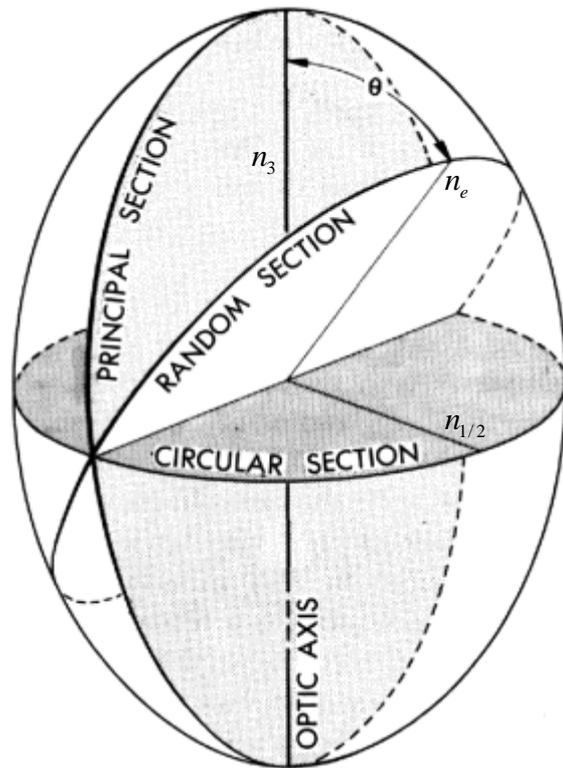


Abbildung 2: Indikatrix (optisch einachsigt)

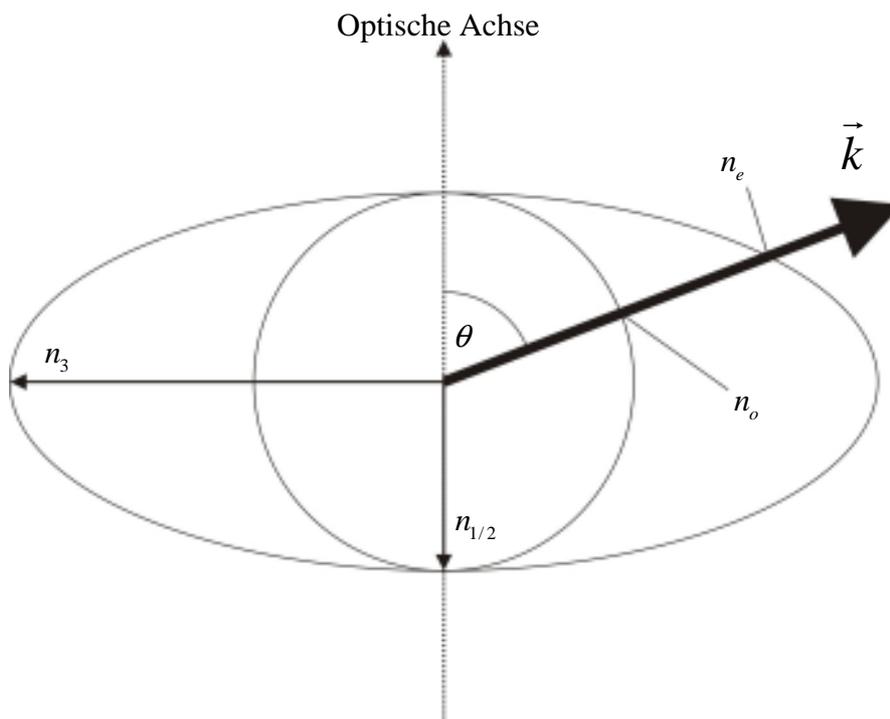


Abbildung 3: 2d-Darstellung der Indikatrix (Kombination aus Quer und Längs-Richtung)

III. Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau dieses Versuchs ist eigentlich für sich selbst sprechend. Zum Ausleuchten der verschiedensten Materialien stand uns ein Prado 250/500 zur Verfügung. Er war wie erwartet mit den benötigten Polarisationsvorsatz ausgestattet auf dem sich wie auf dem Bild zu sehen bereits zwei

Polarisationsfilter (Polarisator und Analysator), ein drehbarer Objektisch und ein Objektiv mit aufgesetzter Irisblende befand.

Für die weiteren Versuche war ein $\lambda/4$ - und $\lambda/2$ -Phasenschieber, verschiedene Filter, Lochblende

und ein Linsenpaar, zur Erzeugung eines konoskopischen Strahlengangs, und natürlich die verschiedenen Präparate der zu untersuchenden Materialien vorhanden.



Abbildung 4: Prado 250/500

IV. Durchführung des Versuchs

Aufgabe 1:

Bauen sie einen orthoskopischen Strahlengang auf. Beobachten und erklären sie die Interferenzerscheinungen in polarisiertem Licht an folgenden Präparaten:

a) Quarzkeil

Zuerst betrachteten wir die Interferenzerscheinungen eines Quarzkeils. Um eine Brechung an der schrägen Kante zu vermeiden, ist dem Keil ein Glaskörper aufgesetzt. Somit ist gewährleistet, dass die Strahlengänge parallel bleiben. Die dadurch beobachtbare Erscheinung ist ein Dichroismus. Je nach gekreuzter und paralleler Stellung des Polarisators und Analysators zeigen sich unterschiedliche Bilder. Wir betrachten nun die parallele Stellung (gekreuzt analog nur in komplementärer Farbe). Man sieht hierbei sehr gut, wie der Brechungsindex sich auf die verschiedenen Wellenlängen auswirkt. Während am dünnen Ende des Quarzkeils noch nahezu kein Dichroismus auftritt, verschieben sich die verschiedenen Farben unterschiedlich stark je dicker der Kristall wird. Es kommt somit zu der sichtbaren Aufspaltung.

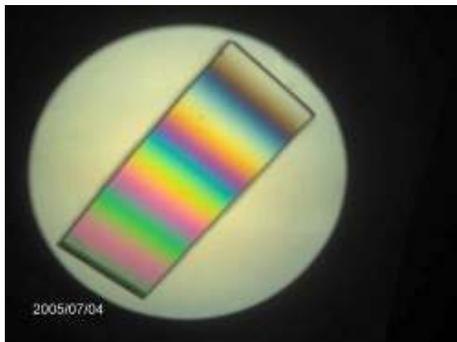
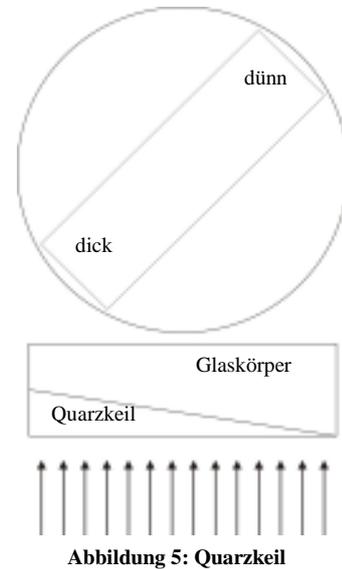


Abbildung 6: Quarzkeil, parallel

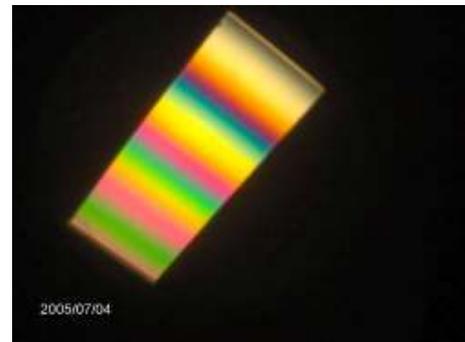


Abbildung 7: Quarzkeil, gekreuzt

b) Gips, ungleich dick

Derselbe Effekt ist nun beim ungleich dicken Gips zu beobachten. Es ist schön zu sehen wie die Unebenheiten im Material als farblichen Verläufe von rot nach violett, also von dicker nach dünner, dargestellt werden. Wichtig ist hierbei nur, darauf zu achten, dass auch gleiche Farben unterschiedlicher Ordnung auftreten können. D.h. nur zusammenhängende Gebiete gleicher Farbe sind wirklich gleich dick. So ist bei unserer Probe z.B. der gelbe Bereich mit blau-violetter Umrandung wesentlich dünner als die restlichen gelben Bereiche.

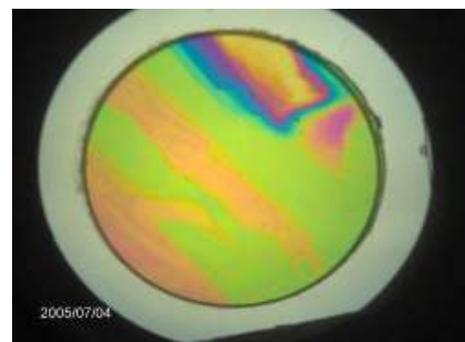


Abbildung 8: Gips, parallel

- c) Plexiglasstab bei Belastung
Im Gegensatz zu den vorherigen Präparaten wird hier der Brechungsindex eines gebogenen Plexiglasstabes durch die Belastung direkt geändert. Bei gleicher Dicke kommt es hier ebenso zu den farblichen Aufspaltungen. Da hier eine gekreuzte Stellung von Polarisator und Analysator gewählt wurde, entspricht der schwarze Streifen im inneren einer Zone ohne Belastung. Nach außen (oben und unten) hin werden die Spannungen immer stärker.

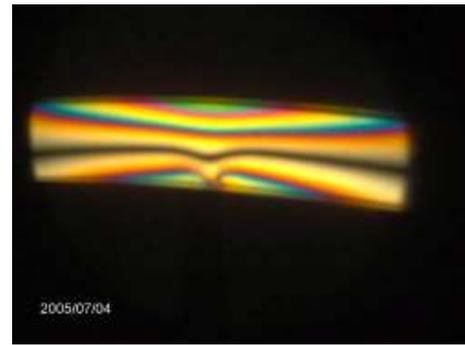


Abbildung 9: Plexiglasstab unter Belastung, gekreuzt

- d) Zusätzliche Betrachtungen
Die gleichen Interferenzerscheinungen kann man auch bei einem Würfel beobachten, der kurz nach seiner Herstellung mit einem Stempel mittig angeschlagen wurde. Dadurch haben sich die Verspannungen im Würfel erhalten. Man sieht sehr gut wie die Belastung von der Mitte in die Ecken abgestrahlt wurde.

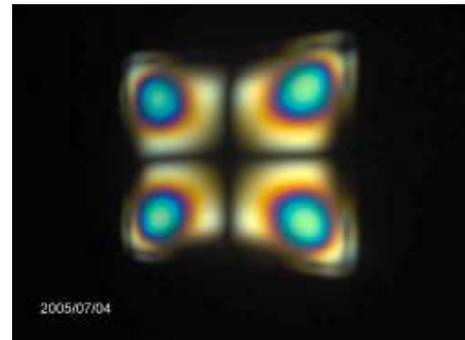


Abbildung 10: gestempelter Würfel, gekreuzt

Aufgabe 2:

Der wirksame Winkel des Quarzkeils beträgt $\theta=0,6^\circ$ seine Abmessungen sind $x_{\text{Quarzkeil}}=23,8\text{mm}$. Bestimmen sie die Doppelbrechung von Quarz:

- a) in monochromatischem Licht der Wellenlänge 479nm, 520nm, 595nm, und 652nm

Dazu wurden bei gekreuzter Stellung jeweils die unterschiedlichen Filter in den Versuchsaufbau eingelegt. Der Quarzkeil wurde auf eine Länge l_{Bild} von 15,9cm abgebildet. Dann wurden die jeweiligen Minima ausgemessen:

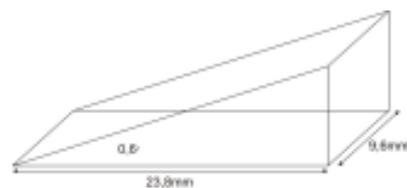


Abbildung 11: Abmessungen des Quarzkeils

$\lambda=497\text{nm}$:

k	x_k in cm	d in mm	Δn
1	3,5	0,055	0,0101
2	7	0,110	0,0101
3	10,6	0,166	0,0100
4	14,3	0,224	0,0099
		Mittelwert:	0,0100

$\lambda=520\text{nm}$:

k	x_k in cm	d in mm	Δn
1	3,7	0,058	0,0095
2	7,6	0,119	0,0093
3	11,3	0,177	0,0093
		Mittelwert:	0,0094



Abbildung 12: Quarzkeil mit 497nm-Filter

$\lambda=595\text{nm}$:

k	x_k in cm	d in mm	Δn
1	4,5	0,071	0,0078
2	9,2	0,144	0,0077
3	13,8	0,216	0,0077
		Mittelwert:	0,0077

$\lambda=652\text{nm}$:

k	x_k in cm	d in mm	Δn
1	4,6	0,072	0,0077
2	9,4	0,147	0,0075
3	14,3	0,224	0,0074
		Mittelwert:	0,0075

Die Werte wurden mit diesen Formeln berechnet:

$$\Delta n = k \frac{\lambda}{d} \quad \text{und} \quad d = \frac{x \cdot l_{\text{Quarzkeil}}}{l_{\text{Bild}}} \tan \theta$$

Wie erwartet ist die Differenz zwischen ordentlichen und außerordentlichen Strahl Δn abhängig von der Wellenlänge. Er liegt bei unserer Messreihe zwischen:

$$\Delta n = 0,0075 - 0,0100$$

- b) in weißem Licht aus den Interferenzfarben unter Verwendung des λ -Plättchens (rot 1. Ordnung)

Wie der Name schon sagt, bewirkt das λ -Plättchen bei gekreuzter Stellung einen dunklen Streifen der zugehörigen ($\lambda=552\text{nm}$)-Linie 1. Ordnung.

In paralleler Stellung sieht man wie gewohnt das komplementäre Bild.

Der Versuch wurde jeweils mit einem 2π - und einem $\pi/2$ -Phasenschieber durchgeführt:

Δl	x in cm	d in mm	Δn in 10^{-3}
2π	3,90	0,061	0,0090
$\pi/2$	1,00	0,016	0,0088
		Mittelwert:	0,0089

Es wurden folgende Formeln verwendet:

$$\Delta n = \frac{\Delta l \cdot \lambda}{2\pi d} \quad \text{und} \quad d = \frac{x \cdot l_{\text{Quarzkeil}}}{l_{\text{Bild}}} \tan \theta$$

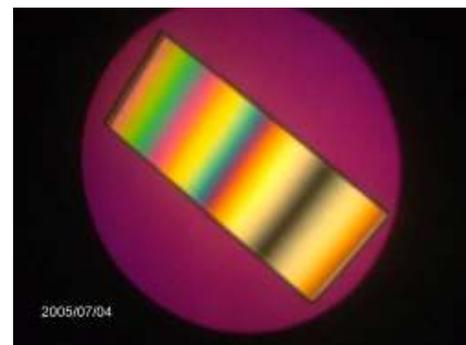


Abbildung 13: Quarzkeil mit λ -Plättchen, gekreuzt

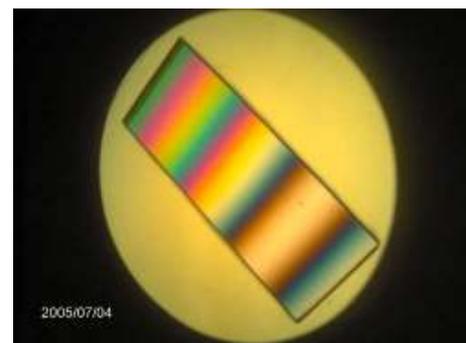


Abbildung 14: Quarzkeil mit λ Plättchen, parallel

Aufgabe 3:

Bestimmen sie mit Hilfe des Quarzkeils die Doppelbrechung von Glimmer

Wenn man explizit die 552nm-Linie betrachtet kann man auch die Doppelbrechung von dem aus Glimmer bestehenden λ -Plättchens berechnen. Dazu betrachtet man die Verschiebung dieser Linie beim Einbringen eines zweiten Phasenschiebers ($\Delta l = \pi/2$) in den Versuchsaufbau ($x_1=5\text{cm}$, $x_2=2,7\text{cm}$):

$$\Delta n_{\text{Glimmer}} = \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta l = \frac{\lambda \cdot l_{\text{Bild}}}{2\pi x \cdot l_{\text{Quarzkeil}}} \Delta l = \frac{\lambda \cdot l_{\text{Bild}} \Delta l}{2\pi \frac{(x_1 - x_2)}{2} l_{\text{Quarzkeil}}} \cot \theta = 0,0077$$

Aufgabe 4:

Bauen sie einen konoskopischen Strahlengang auf und beobachten und erklären sie die Interferenzerscheinungen in polarisiertem Licht mit folgenden Präparaten:

- a) Kalkspat, senkrecht zur optischen Achse geschnitten

Um den konoskopischen Strahlengang zu realisieren wurden zwei Sammellinsen in den Versuchsaufbau integriert. Da die Strahlen nun nicht mehr parallel zueinander stehen, sieht jeder Strahl eine andere Dicke des Präparats. Es kommt also wieder zu einer Aufspaltung des Spektrums. Der Polarisator wurde wieder gekreuzt zum

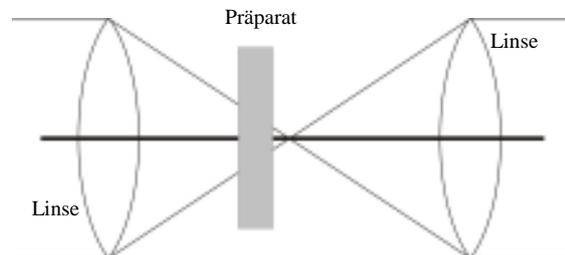


Abbildung 15: konoskopischer Strahlengang

Analysator ausgerichtet, sodass in der Mitte des Bildes ein Kreuz zu sehen ist. Dies ist zu erklären, da der Kalkspat ja senkrecht zu seiner optischen Achse geschnitten ist. D.h. die Polarisation aller Strahlen, deren Längskomponente der Ausbreitungsrichtung senkrecht auf die optische Achse steht, wird nicht verdreht. Bringt man nun einen Phasenschieber in den Versuchsaufbau wird das dunkle Kreuz zu einem pinken verschoben. Zusätzlich bemerkt man ein unterschiedliches Verhalten in den einzelnen Quadranten. Im zweiten und vierten Quadranten ist jetzt ein schwarzer Ringabschnitt zu sehen, während im ersten und dritten nur eine andere Aufspaltung des Spektrums festzustellen ist. Man spricht dabei von einem optisch negativen einachsigen Kristall. Man kann ihm eine Indikatrix zuordnen, bei der $n_1 = n_2 < n_3$.

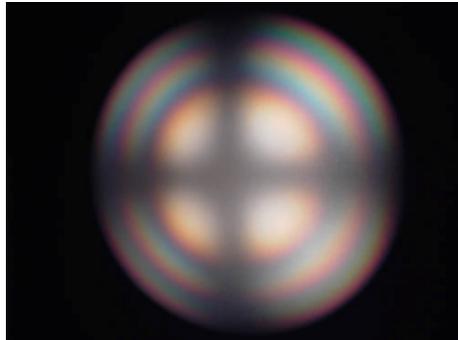


Abbildung 16: Kalkspat, gekreuzt

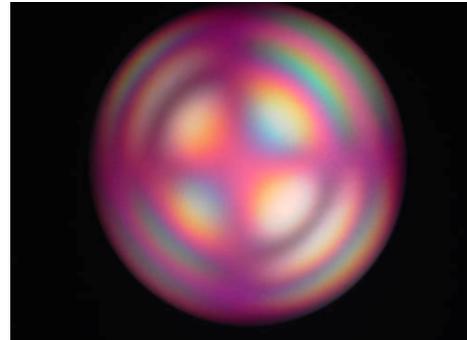


Abbildung 17: Kalkspat mit λ -Plättchen, gekreuzt

- b) Quarz, senkrecht zur optischen Achse geschnitten

Im Vergleich zum Kalkspat kann man hier jetzt schon sehen, dass es sich beim Quarz um einen optisch positiven einachsigen Kristall handelt, da der erste und dritte Quadrant den schwarzen Ringabschnitt aufweisen. Des Weiteren kann man auch aus der geringeren Anzahl und den dickeren Ringen sehen, dass die Brechungsindizes für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl näher zusammen liegen.



Abbildung 18: Quarz mit λ -Plättchen

- c) Glimmer, senkrecht zur ersten Mittellinie geschnitten

Als nächstes betrachten wir Glimmer, der ja zwei optische Achsen besitzt. Das Bild zeigt uns die Ausrichtung des Präparats so, dass die optischen Achsen in einer Ebene senkrecht zur Polarisationsrichtung liegen. Das Einschieben des Phasenfaktors zeigt wieder die bekannten Verschiebungen in den einzelnen Sektoren.

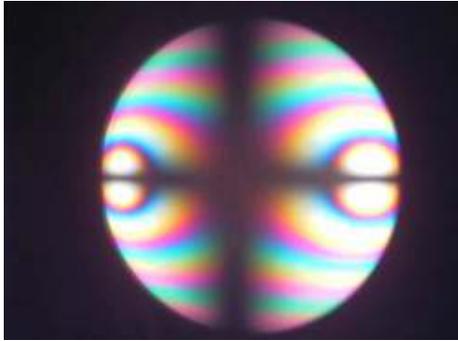


Abbildung 19: Glimmer

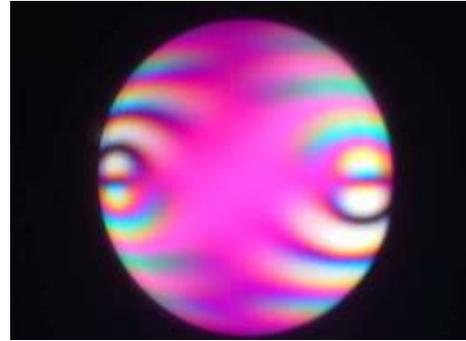


Abbildung 20: Glimmer mit λ -Plättchen

- d) Topas, senkrecht zur ersten Mittellinie geschnitten

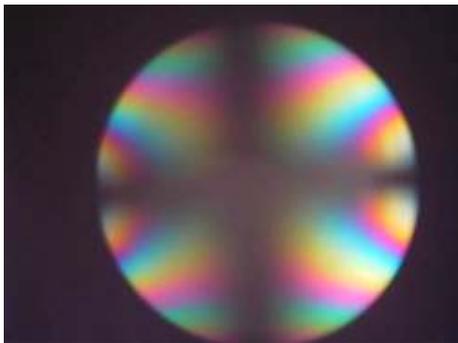


Abbildung 21: Topas, gekreuzt

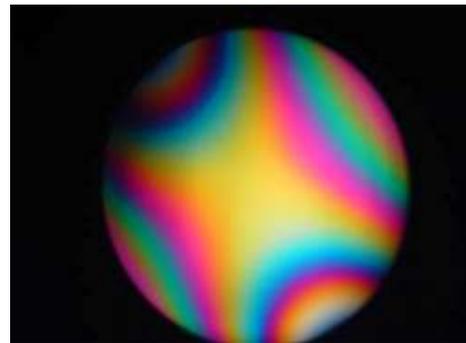


Abbildung 22: Topas, 45°-gedreht

Beim Topas der ja ebenfalls zwei optische Achsen besitzt, haben wir zusätzlich das Präparat so gestellt, das die Ebene der optischen Achsen im 45°-Winkel zwischen Polarisator und Analysator steht. Es ist hier schön wie jeder der zwei Achsen einen kreisrundes Bild erzeugt, um dass sich die Farben nach außen hin aufspalten.

- e) sonstiges

Als letzte Betrachtung haben wir noch unser Geodreieck im konoskopischen Strahlengang beobachtet. Hier erkennt man, dass der Aufdruck schon aufgetragen wird, bevor der Kunststoff ganz ausgetrocknet ist. Dadurch entstehen Verspannungen die wieder sichtbar gemacht werden können. Dies wird vor allem wegen der besseren Haftung des Aufdrucks auf dem Dreieck durchgeführt.

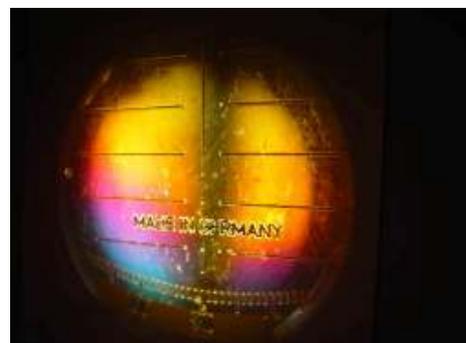


Abbildung 23: Verspannungen im Geodreieck

Aufgabe 5:

Beobachten und erklären sie die optische Aktivität von Quarz im konoskopischen Strahlengang

In Aufgabe vier ist uns schon aufgefallen, dass beim Quarz trotz gekreuzter Stellung nicht mehr die maximale Auslöschung wie sie z.B. beim Glimmer auftrat zu sehen war. Zur genaueren Untersuchung verwendeten wir deshalb ein dickeres Quarzpräparat ($d=3,8\text{mm}$). Wie in Abb. 24 zu sehen sind hier die dunklen Bereiche schon nicht mehr zu sehen. Dies liegt an der optischen Aktivität des Quarzes, die bewirkt, dass die Polarisation im Quarz, abhängig von der Wellenlänge des Lichtes, gedreht wird. Je dicker das Präparat, desto mehr

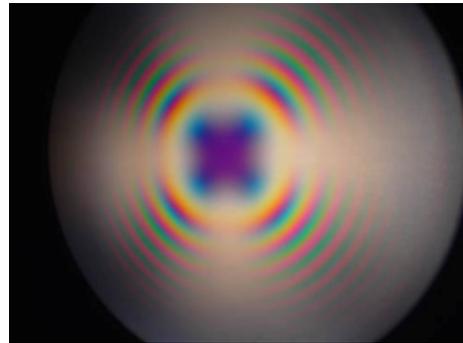


Abbildung 24: dicker Quarz

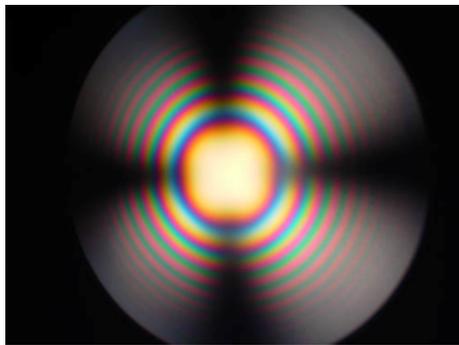


Abbildung 25: dicker Quarz, nachgedreht

Farbverschiebung ist also zu sehen. Durch nachdrehen des Analysators, lässt sich das gewohnte Bild mit maximaler Auslöschung wieder herstellen (Abb. 25).

Bringt man verschiedenen Filter in den Versuchsaufbau ein, kann man die wieder die Abhängigkeit von den einzelnen Wellenlängen bestimmen. Dazu muss man für die unterschiedlichen Filter bis zur maximalen Auslöschung nachdrehen. Der Nachdrehwinkel φ ist Signifikant für das jeweilige Präparat.

Es ergaben sich folgende Werte:

λ in nm	φ in $^\circ$
652	62
497	-70
595	66
520	-89

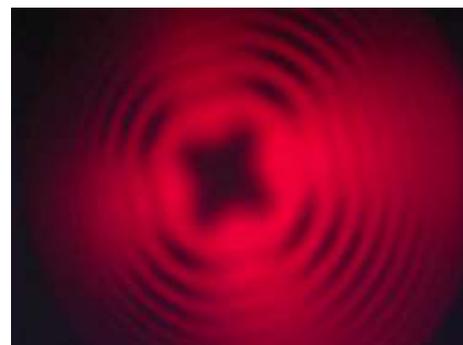


Abbildung 26: dicker Quarz, mit 652nm-Filter, nachgedreht

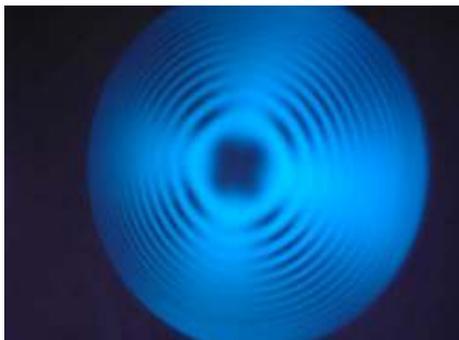


Abbildung 27: dicker Quarz mit 497nm-Filter, nachgedreht

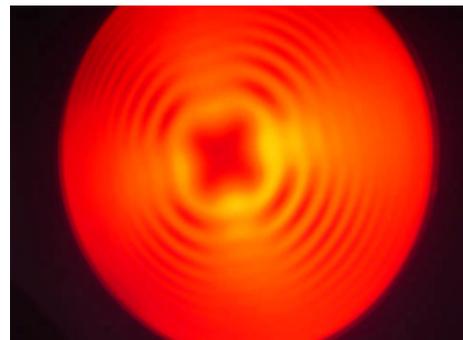


Abbildung 28: dicker Quarz mit 595nm-Filter

V. Literatur und Quellangaben

- Gerthsen/Kneser/Vogel, Physik, Springer Verlag, 15. Auflage, 1986
- Honc/Morhard, Protokoll 17: Brechung von Licht an dielektrischen Oberflächen, 2004
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Doppelbrechung>, 2005
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Dichroismus>, 2005
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Polarisation>, 2005
- <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~jesnow/Polmik/Week4.htm>