

# 4.7 Flüssigkristalle und nichtlineare Optik

## Ausarbeitung

Fortgeschrittenenpraktikum an der TU Darmstadt

Versuch durchgeführt von: Mussie Beian (■■■■■■■■■■), Florian Wetzel (■■■■■■■■■■)

Versuchsdatum: 12.01.2009

Betreuer: Patrick Villwock



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

## Inhaltsverzeichnis

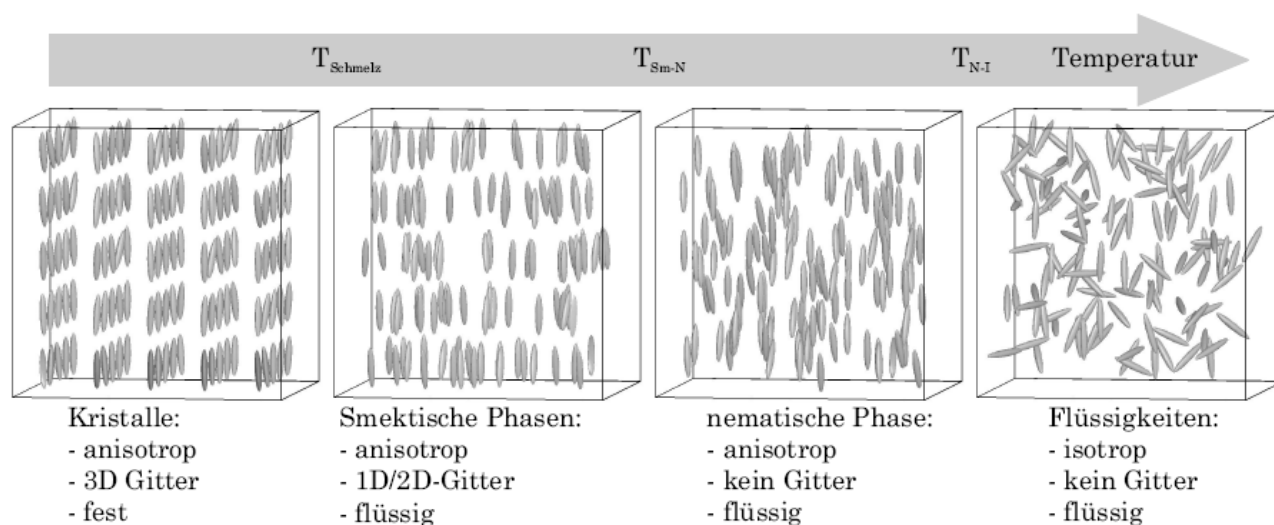
1.....	Theorie zum Versuch.....	3
1.1.	Flüssigkristalle.....	3
1.2.	Maier-Saupe-Theorie.....	4
1.3.	Experimentelle Bestimmung des Ordnungsparameters.....	5
1.4.	Optische Reorientierung.....	5
1.5.	Experimenteller Nachweis der Optischen Reorientierung.....	6
2.....	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	7
2.1.	Temperaturabhängigkeit des Ordnungsparameters.....	7
2.1.1.	Versuchsaufbau und Durchführung.....	7
2.1.2.	Graphische Darstellung der Absorptionskoeffizienten.....	8
2.1.3.	Graphische Darstellung des skalaren Ordnungsparameters in Abhängigkeit von <b><i>Tred</i></b> .....	8
2.2.	Die Disklinationslinie unter dem Mikroskop.....	9
2.3.	Das Beugungsbild der Disklinationslinie.....	10
3.....	Erklärung über die selbstständige Anfertigung.....	11

## 1. Theorie zum Versuch

### 1.1. Flüssigkristalle

Als Flüssigkristalle (engl.: Liquid Crystal, Abk.: LC) bezeichnet man Stoffe, die sowohl Eigenschaften von Flüssigkeiten als auch kristalliner Festkörper besitzen. Dabei ist die Orientierung der Moleküle weitestgehend mit kristallinen Strukturen vergleichbar, also anisotrop. Allerdings erinnert die räumliche Anordnung eher an eine Flüssigkeit, da die Molekülschwerpunkte nicht regelmäßig angeordnet sind. Zur weiteren Vereinfachung modelliert man die Moleküle als Ellipsoide. (siehe Maier-Saupe-Theorie)

In unserem Versuch befindet sich der Flüssigkristall in der sogenannten nematischen Phase. Dies ist eine der wichtigsten Mesophasen, in die man Flüssigkristalle zur besseren Unterscheidung unterteilt.



Quelle: Anleitungsblatt zum Versuch

Diese Phasen unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Direktor und den skalaren Ordnungsparameter. Der Direktor wird durch einen Vektor  $\vec{n}$  beschrieben, der in Richtung der Vorzugsrichtung der Moleküle zeigt. Der Ordnungsparameter  $S$  ist ein Maß für die mittlere Abweichung der Moleküle vom Direktor. Der Ordnungsparameter ist wie folgt definiert:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle$$

$\theta$  ist hier der Winkel, der die Abweichung eines Moleküls vom Direktor beschreibt. Da der Ordnungsparameter  $S$  das gesamte System beschreibt, wird die Abweichung über alle Moleküle gemittelt. Dies wird durch die spitzen Klammern verdeutlicht.

Der Ordnungsparameter kann Werte von  $-\frac{1}{2}$  bis 1 annehmen. Charakteristische Ordnungsparameter sind hierbei:

Phase	Ordnungsparameter
kristallin	1
isotrop	0
nematisch	0,4 – 0,8

---

## 1.2. Maier-Saupe-Theorie

Die parallele Ausrichtung der LC-Moleküle lässt sich folgendermaßen begründen:

1. Langgestreckte Objekte ordnen sich allein aufgrund ihrer Form parallel zueinander an. (z.B. Stifte im Mäppchen). Weiterhin ist es von der Entropie her gesehen günstiger, wenn die Moleküle parallel angeordnet sind, da dann auch die Molekülbewegungen eingeschränkt sind. (Packungsentropie)
2. Langreichweitige Wechselwirkungen: Van-der-Waal Wechselwirkung zwischen induzierten Dipolen und oder höheren Multipolen.

Um dies nun quantitativ berechnen zu können, machten Maier und Saupe folgende Vereinfachungen:

- Die Maier-Saupe-Theorie ist eine Mean-Field-Theorie. Das heißt man betrachtet nicht die Wechselwirkungen der Teilchen untereinander, sondern ein Teilchen im mittleren Potential der anderen. Dies hat den Vorteil, dass man kein Viel-Teilchen System hat.
- Das Potential ist proportional zum Ordnungsparameter.
- Es werden nur Dipol-Dipol-Wechselwirkungen berücksichtigt.

Mit diesen Näherungen ergibt sich für die potentielle Energie eines mit  $(\theta, \phi)$  orientierten Moleküls das folgende Potenzial:

$$U(\theta) = -\frac{A}{2\bar{V}^2} S_p(T) (3\cos^2\theta - 1)$$

$V$  ist hierbei das Molvolumen,  $S_p(T)$  der temperaturabhängige Ordnungsparameter und  $A$  eine Konstante. Aufgrund der Zylindersymmetrie ist  $U$  nur von  $\theta$  und nicht von  $\phi$  abhängig. Die Energie ist maximal für  $\theta = \frac{\pi}{2}$  und minimal für  $\theta = 0$ .

Die Orientierungsverteilung  $f(\theta, \phi)$  ist Boltzmann-verteilt.

$$f(\theta) \sim e^{-\frac{U(\theta)}{kT}}$$

Mithilfe dieser Verteilung lässt sich  $S(T)$  numerisch bestimmen. Für die nematische Phase ergibt sich damit universell.

$$S \approx (1 - 0.98 T_{red})^{0,22}$$

$T_{red}$  ist hierbei die reduzierte Temperatur, die durch folgende Normierung definiert ist:

$$T_{red} = \frac{T\bar{V}^2}{T_N\bar{V}_N^2}$$

---

### 1.3. Experimentelle Bestimmung des Ordnungsparameters

Um nun den Ordnungsparameter eines LCs zu bestimmen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die wohl einfachste Methode dies zu tun ist die Absorptionsmessung. (Zitat des Betreuers: „Ich habe gelacht, als ich die anderen Methoden gelesen habe. [...] So viel Aufwand, wenn es doch erheblich einfacher geht!“)

Bei der Absorptionsmessung dotiert man den LC mit Farbstoffmolekülen, welche sich auch in Richtung des Direktors ausrichten. Misst man nun die Intensität parallel und senkrecht zum Direktor, erhält man unter Ausnutzung des Beerschen Gesetzes

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I \Rightarrow I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

die Absorptionskoeffizienten  $\alpha_{\parallel}$  und  $\alpha_{\perp}$ . Aus den Formeln für die Absorptionskoeffizienten

$$\alpha_{\parallel} = \frac{1}{3} B h \nu (1 + 2S); \quad \alpha_{\perp} = \frac{1}{3} B h \nu (1 - S)$$

erhält man nun den Zusammenhang aus Absorptionskoeffizienten und dem gesuchten Ordnungsparameter:

$$S = \frac{\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}}{\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}}$$

### 1.4. Optische Reorientierung

Befindet sich ein LC in einem elektrischen Feld, so wird er polarisiert. Aufgrund der Anisotropie des LCs ist der Zusammenhang zwischen E-Feld  $\vec{E}$  und Verschiebungsdichte  $\vec{D}$  nicht mehr linear.  $\vec{E}$  und  $\vec{D}$  sind nun vielmehr über den Dielektrizitätstensor  $\vec{\epsilon}$  verknüpft:

$$\vec{D} = \vec{\epsilon} \vec{E}$$

Dadurch ergibt sich ein induziertes Drehmoment  $\vec{\Gamma} = \vec{D} \times \vec{E}$ . Es ist minimal für  $\vec{D} \parallel \vec{E}$  und maximal für  $\vec{D} \perp \vec{E}$ . Weiterhin gilt

$$|\vec{\Gamma}| \sim |\vec{E}|^2 \sim I$$

Auch durch Einstrahlen linear polarisierter elektromagnetischer Strahlung, wie z.B. mit einem entsprechend polarisierten Laser kann ein solches Drehmoment induziert werden. In diesem Fall spricht man von „optischer Reorientierung“.

Schickt man einen linear polarisierten Strahl durch das LC, so verändert sich durch die Reorientierung der Moleküle auch der effektive Brechungsindex:

$$n_{eff}(I) = n_0 + n_2 I$$

Dies bezeichnet man als kerrartigen, nichtlinearen, optischen Effekt.

Da das Strahlprofil eines Lasers in der Regel gaussförmig ist, variiert auch der Brechungsindex entsprechend gaussförmig. In 1. Näherung entspricht diese Profil einer Linse. Je nach Vorzeichen von  $n_2$  wird der Strahl entweder fokussiert ( $n_2 > 0$ ) bzw. defokussiert ( $n_2 < 0$ ).

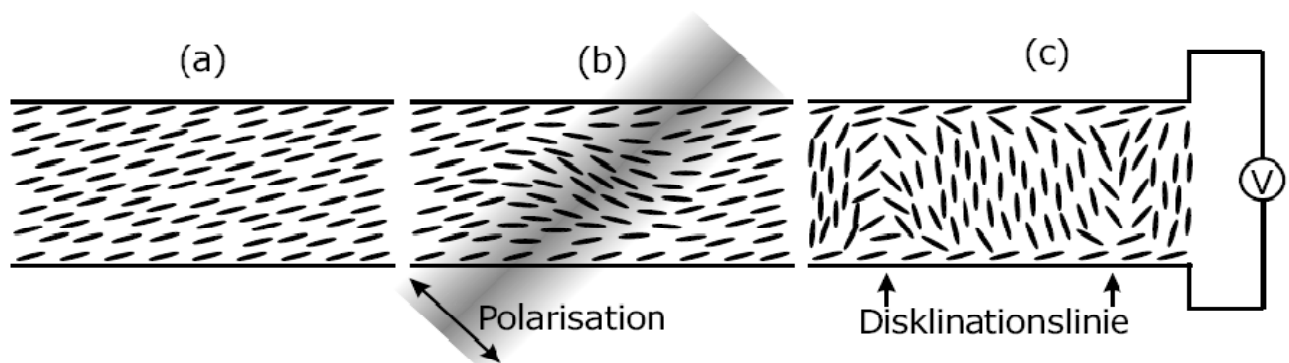
Man nennt dies auch Selbstfokussierung bzw. Selbstdefokussierung, da der Laser die Ursache für die Änderung seines Phasenprofils ist.

## 1.5. Experimenteller Nachweis der Optischen Reorientierung

Um die optische Reorientierung nachzuweisen zu können verwendet man einen LC dessen Direktor der Substratebene gegenüber etwas geneigt ist. Diese Neigung nennt man Pretilt. (Abb. a)

Strahlt man nun einen Laser orthogonal zum Pretilt in den LC, so richten sich die LC Moleküle in bestrahlten gebiet dem Pretilt entgegengesetzt aus.(8)

Anschließend wird über transparente ITO-Elektroden am LC (Abb. c) eine ausreichend hohe niederfrequente Wechselspannung angelegt. Man verwendet hierbei Wechselspannung, damit innerhalb des LCs keine Ströme fließen.



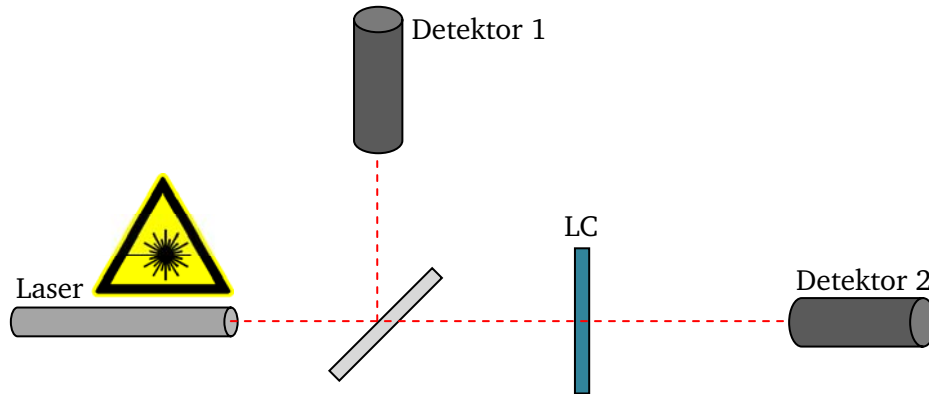
Quelle: Anleitungsblatt zum Versuch

Die Moleküle richten sich entsprechend der angelegten Spannung aus. Diese Rotation erfolgt in Richtung des kleineren Drehwinkels. Dadurch wird der Direktor innerhalb des bestrahlten Gebietes noch weiter entgegengesetzt des Pretilts gedreht. Die Moleküle, die außerhalb des bestrahlten Gebietes liegen, drehen sich jedoch in die andere Richtung. Die Grenze zwischen bestrahltem und unbestrahltem Gebiet nennt man Disklinationslinien. (Abb. c)

## 2. Versuchsdurchführung und Auswertung

### 2.1. Temperaturabhängigkeit des Ordnungsparameters

#### 2.1.1. Versuchsaufbau und Durchführung



Zur Bestimmung des Ordnungsparameters verwendet man den obenstehenden Aufbau. Ein Laserstrahl wird an einem Strahlteiler geteilt. Strahl 1 trifft auf Detektor 1, um sicherzustellen, dass der Laser stabil läuft und die Messung nicht durch Intensitätsschwankungen des Lasers verfälscht wird. Strahl 2 läuft geradeaus weiter durch die dreh- und heizbare Halterung für die LC-Zelle. Zur Beschreibung der Versuchsdurchführung benötigen wir nun das Beersche Gesetz.

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

Durch Umformen erhält man  $\alpha = -\frac{1}{z} \ln \left( \frac{I(z)}{I_0} \right)$ .  $z$  beträgt in unserem Versuch  $50 \mu\text{m}$ .

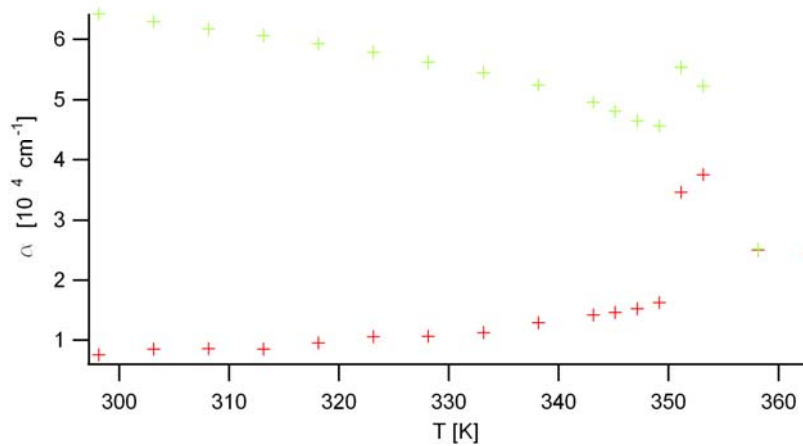
Um eine Nullmessung durchzuführen, verwendet man zunächst eine undotierte LC-Zelle und betrachtet die Intensität. Die Zelle lässt sich in der Apparatur drehen. Somit kann man über Intensitätsminimum und -maximum auf die Richtung des Direktors schließen. Als  $I_0$  haben wir den Mittelwert aus den beiden Extremwerten der Intensitätsverteilung gewählt.

Nun tauscht man die durchsichtige LC-Zelle gegen die dotierte aus, und richtet sie parallel zum Direktor aus. Man misst dann in eine Richtung das heißt für steigende Temperatur die Temperaturabhängigkeit von  $I(z)_\parallel$ .

Dann lässt man den LC wieder abkühlen. Würde man  $I(z)_\perp$  messen während der LC abkühlt würden Hystereseffekte die Messung unbrauchbar machen. Daher wiederholt man die Prozedur nochmal nachdem der LC wieder auf Raumtemperatur abgekühlt ist.

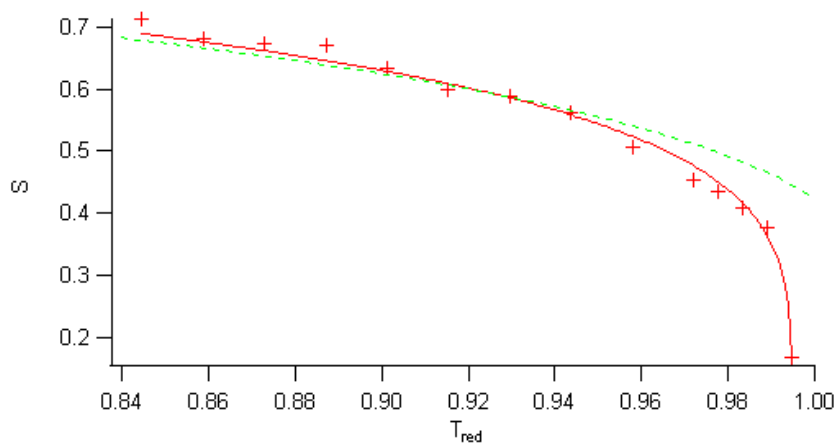
Über die Formel  $\alpha = -\frac{1}{z} \ln \left( \frac{I(z)}{I_0} \right)$  errechnet man dann die gesuchten Absorptionskoeffizienten und damit schließlich den skalaren Ordnungsparameter  $S$ .

### 2.1.2. Graphische Darstellung der Absorptionskoeffizienten



Bei der temperaturabhängigen Darstellung der Absorptionskoeffizienten  $\alpha_{\parallel}$  (rot) und  $\alpha_{\perp}$  (grün) fallen die Absorptionsmaxima stark ins Auge, die bei beiden bei der gleichen Temperatur auftreten. Dies ist die Temperatur  $T_N$ , über die später die Temperatur normiert wird.  $T_N$  haben wir in unserem Versuch auf ca. 353 K geschätzt.

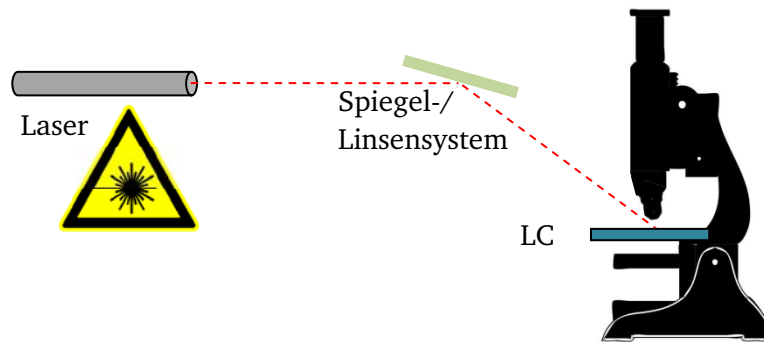
### 2.1.3. Graphische Darstellung des skalaren Ordnungsparameters in Abhängigkeit von $T_{red}$



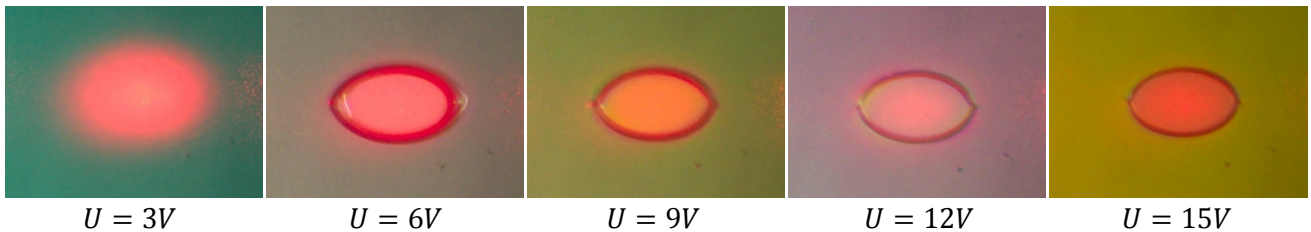
Bei der graphischen Darstellung des skalaren Ordnungsparameters  $S$  über der reduzierten Temperatur haben wir zu unseren Messwerten einen Fit der Form  $S = (1 - A * T_{red})^B$  durchgeführt (rot). Wir haben folgende Fitparameter erhalten:  $A = 1,0052$ ;  $B = 0,196 \pm 0,003$ . Die grüne Kurve entspricht der Modellvorstellung und folgt der Funktionsgleichung  $S = (1 - 0,98 * T_{red})^{0,22}$ . Diese ist an der Stelle  $T_{red} = 1$  unstetig und  $S(T_{red} > 1) = 0$ .



## 2.2. Die Disklinationslinie unter dem Mikroskop

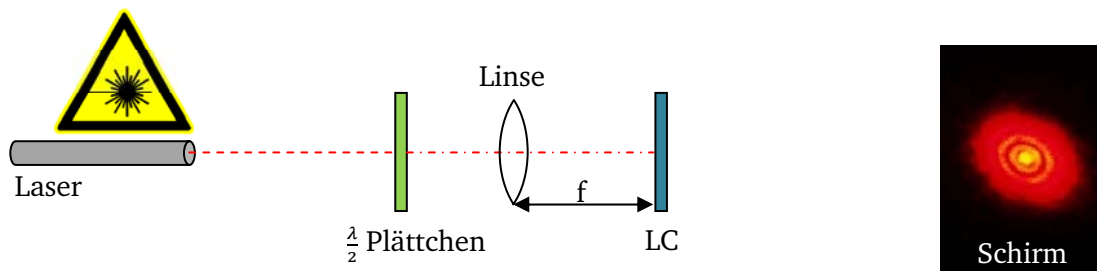


Fokussiert man den Laserstrahl über eine Spiegel-/ Linsensystem auf den LC, der zusätzlich einem elektrischen Feld ausgesetzt ist, so lassen sich Disklinationslinien mithilfe eines Mikroskops sichtbar machen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der einfallende Laserstrahl orthogonal zum Direktor eingestellt ist. Die Spannung des elektrischen Feldes ließ sich regeln. Folgende Bilder konnten wir unter dem Mikroskop betrachten:



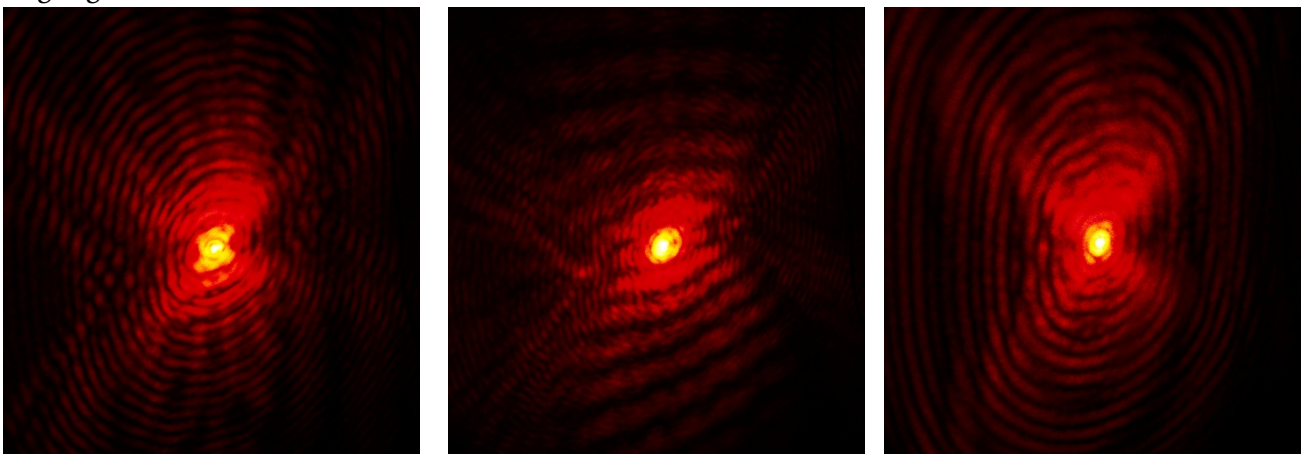
Bei ca. 5 V veränderte sich die Struktur völlig und es bildete sich ein elliptischer Ring. Je stärker wir das elektrische Feld erhöhten, desto schmaler wurde der Ring und umso größer wurde damit die Fläche innerhalb des Ringes. Die seitlichen Rundungen der Ellipse wurden zudem mit zunehmender Spannung spitzer.

### 2.3. Das Beugungsbild der Disklinationslinie



Um das Beugungsbild der Disklinationslinien betrachten zu können, musste aufgrund unserer Anordnung die Polarisations Ebene des Lasers mithilfe eines  $\frac{\lambda}{2}$  Plättchens gedreht werden, so dass diese senkrecht zum Direktor liegt. Um dies zu justieren, bauten wir den Aufbau zunächst ohne LC auf und fügten anstelle dessen einen Polarisator ein. Dann justierten wir das  $\frac{\lambda}{2}$  Plättchen derart, dass wir auf dem Schirm ein Intensitätsminimum hatten. Anschließend ersetzten wir den Polarisationsfilter durch den LC derart, dass der Direktor in Richtung der Polarisations Ebene des Polarisators zeigte.

Mit dem LC in der Apparatur konnten wir je nachdem welche Spannung wir am LC anlegten, diverse Beugungsbilder feststellen:



Alle Beugungsbilder wiesen Überlagerungen gewisser Grundstrukturen auf, die wir in diesen 3 Fotos versucht haben, festzuhalten. Im ersten Foto erkennt man eine gewisse 8, die von den Beugungsbildern der Disklinationslinie herrührt. Im zweiten Foto werden horizontale, beinahe parallele Linien deutlich. Das dritte Bild zeigt relativ deutlich eine X-förmige Struktur. Diese ist auf die LC-Zelle zurückzuführen, welche durch Reflektion an ihren beiden Innenseiten als Etalon wirkt.

Verschoob man den LC längs zum einfallenden Laserstrahl, so löste sich die Kreisstruktur auf:



Links sieht man ein Foto des Beugungsbildes bei einer Verschiebung des LC nach links (aus Sicht des einfallenden Strahls), rechts sieht man die entsprechend andere Richtung.



Diese Veränderung des Bildes ist auf die Trägheit der Flüssigkeitsmoleküle in Bezug auf die vorgenommene Bewegung des LC zurückzuführen.

---

### **3. Erklärung über die selbstständige Anfertigung**

---

Wir erklären hiermit, dass wir die Ausarbeitung mit dem Titel „4.7 Flüssigkristalle und nichtlineare Optik – Ausarbeitung“ im Rahmen des Fortgeschrittenen-Praktikums im Wintersemester 2008/09 selbständig angefertigt, keine anderen Hilfsmittel benutzt und alle aus den Quellen und der Literatur wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen als solche gekennzeichnet haben.

Darmstadt, den 09.03.09