

EC **ENCYCLOPAEDIA
CINEMATOGRAPHICA**

FILM E 2422

Flüssige Kristalle
Elektrisch induzierte Texturänderungen
bei nematischen Phasen

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM • GÖTTINGEN

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 3 · NUMMER 22 · 1977

FILM E 2422



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Tonfilm (Komm., deutsch od. engl.), 16 mm, farbig, 76 m, 7 min (24 B/s). Hergestellt 1974, veröffentlicht 1977.

Das Filmdokument ist für die Verwendung in Forschung und Hochschulunterricht bestimmt. Veröffentlichung aus dem Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie, Göttingen, Prof. Dr. E. SACKMANN, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL; Kamera und Schnitt: J. THIENEL.

Zitierform:

SACKMANN, E., und INST. WISS. FILM: Flüssige Kristalle – Elektrisch induzierte Texturänderungen bei nematischen Phasen. Film E 2422 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von E. SACKMANN und J. THIENEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 3, Nr. 22/E 2422 (1977), 18 S.

Anschrift der Verfasser der Publikation:

Prof. Dr. E. SACKMANN, Abt. für Experimentelle Physik III der Universität Ulm, Oberer Eselsberg, D-7900 Ulm.
J. THIENEL, Institut für den Wissenschaftlichen Film, Nonnenstieg 72, D-3400 Göttingen.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftlichen Ergänzungen zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien von etwa 500 Seiten zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus 4 Lieferungen mit einer entsprechenden Zahl von Einzelheften; jährlich erscheinen 1–4 Lieferungen in jeder Sektion.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (05 51) 2 10 34

ENCYCLOPAEDIA CINEMATOGRAFICA – Editor: G. WOLF

ERICH SACKMANN, Ulm, und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM,
Göttingen:

Film E 2422

Flüssige Kristalle – Elektrisch induzierte Texturänderungen bei nematischen Phasen

Verfasser der Publikation: ERICH SACKMANN, Ulm, und JOSEF THIENEL, Göttingen
Mit 8 Abbildungen

Inhalt des Films:

Flüssige Kristalle – Elektrisch induzierte Texturänderungen bei nematischen Phasen. Der vorliegende Film zeigt im ersten Teil einige typische elektrohydrodynamische Instabilitäten in nematischen Flüssigkristallen. Sie treten beim Überschreiten charakteristischer Schwellspannungen („Umwandlungsfeldstärken“) auf und sind durch ihre (ausgeprägte) Mikrostruktur (Textur) unter dem Polarisationsmikroskop leicht zu unterscheiden. Beim ersten Schwellwert erscheinen die sog. Williamsdomänen, eine streifenartige Domänenstruktur hoher Symmetrie. Beim zweiten Schwellwert zerfällt das Streifenmuster in eine noch regelmäßige Domänenstruktur niedriger Symmetrie, die schließlich bei einer weiteren Schwellspannung in die völlig turbulente „Phase“, den sog. Zustand der „dynamischen Streuung“ übergeht.

Im zweiten Teil wird die Wechselwirkung zwischen „Disklinationslinien“ in nematischen Schichten gezeigt. Diese Defekte der Molekülorientierung entstehen in großer Zahl nach Abschalten des elektrischen Feldes im Zustand der dynamischen Streuung. Je nach Symmetrie der Defekte tritt Abstoßung oder Anziehung über größere Entfernung (von einigen $10^3\mu\text{m}$) auf. Diese Fernkräfte sind die Folge eines orientierungselastischen Kraftfeldes zwischen den Disklinationen. Sie sind eine sehr schöne Demonstration der Fernordnung in Flüssigkristallen.

Summary of the Film:

Liquidified crystal – electrically induced alterations in texture during nematic phases. The first part of the film shows some typical hydrodynamic instabilities in nematic liquid crystals. They appear at well defined threshold voltages (transition field strengths) and they may be well distinguished under a polarizing microscope by their characteristic microstructure (texture). At a first threshold voltage, so called Williams-domains appear, a band-like domain pattern of high symmetry. At a second threshold the pattern decomposes in a still regular domain structure of lower symmetry which at a further threshold field this phase goes over into a completely turbulent state, the so called dynamic scattering regime.

The second part shows the interaction between disclination lines in nematic layers. These defects in molecular orientation appear in large numbers after switching off the electric field in the state of dynamic scattering. Depending on the symmetry of the defect attractive or repulsive forces are observed which are characterized by a very large interaction distance (of the order of some $10^3 \mu\text{m}$). These long distance forces originate in a orientational elastic force field prevailing between the disclinations. They are thus a beautiful demonstration of the long distance order in liquid crystals.

Résumé du Film:

Cristaux liquides – Modifications de texture induites électriquement dans des phases nématiques. La première partie de ce film montre quelques instabilités électro-hydrodynamiques typiques survenant dans des cristaux liquides nématiques. Elles surviennent lorsque des tensions-seuil caractéristiques („intensités de champ transformatrices“) sont dépassées; leur microstructure (texture) nettement caractérisée permet de les distinguer facilement au microscope polarisant. A la première valeur-seuil, apparaissent les domaines dits de William, à savoir une structure à bandes d'une grande symétrie. A la seconde valeur-seuil, le motif à bandes se décompose en une structure de domaine encore régulière, mais d'une symétrie moins grande, qui aboutit enfin, lors d'une tension-seuil suivante, à la „phase“ complètement turbulente, l'état dit de „dispersion dynamique“.

Dans la deuxième partie est montrée l'interaction de „lignes de déclination“ dans des couches nématiques. Ces défauts dans l'orientation moléculaire surviennent en grand nombre après la coupure du champ électrique, dans l'état de dispersion dynamique. Suivant la symétrie des défauts, il se produit un repoussement ou une attraction à distance relativement grande (de quelques $10^3 \mu\text{m}$). Ces forces agissant à distance sont la conséquence d'un champ de force à orientation élastique entre les déclinations. Elles sont une très bonne démonstration de l'agencement à distance dans des cristaux liquides.

Allgemeine Vorbemerkungen

Topologie der Molekülanordnung und Orientierungselastizität nematischer Phasen

In nematischen Flüssigkristallen besteht eine Fernordnung bezüglich der Molekülorientierung (s. Abb. 1). Die Schwerpunkte der Moleküle sind dagegen wie in normalen Flüssigkeiten frei verschiebbar.



nematisch

Abb. 1. Schema der Molekülanordnung in nematischen Phasen

\vec{L} : optische Achse der nematischen Phase

Die spontane Molekülorientierung in Flüssigkristallen ist eine Folge der hohen Anisotropie der zwischenmolekularen Wechselwirkung. Auslenkung der Moleküle aus

der Gleichgewichtsorientierung führt daher zu rücktreibenden Kräften. Die Flüssigkristalle zeigen Orientierungselastizität.

Das elastische Verhalten nematischer Phasen läßt sich durch 3 Grunddeformationen beschreiben: Verbiegung (bend), Spreizung (splay) und Verdrillung (twist). Prinzipiell lassen sich diese getrennt beobachten, wenn man den zwischen Glasplatten geeignet orientierten Flüssigkristall, wie in Abb.2 gezeigt, geeignet deformiert. Bei kleinen Auslenkungswinkeln $\delta\varphi$ gilt das HOOKSche Gesetz (Rückstellkraft proportional Auslenkung $\delta\varphi$). Die 3 Grunddeformationen sind durch drei elastische Konstanten k_{11} (für splay) k_{22} (für twist) k_{33} (für bend) charakterisiert. Die 3 Konstanten haben ähnliche Größen: $k_{11} \approx k_{22} \approx k_{33} \approx 10^{-6}$ dyn.

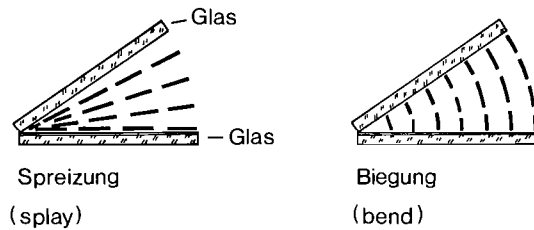
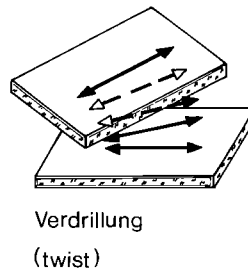


Abb.2. Die 3 Grundtypen der elastischen Deformation in nematischen Phasen. a: Spreizung (splay) – Moleküle parallel zur Glasplatte orientiert; b: Biegung (bend) – Moleküle senkrecht zur Glasplatte orientiert (homöotrope Orientierung); c: Verdrillung (twist) – Moleküle parallel zur Glasplatte orientiert



Defekte in nematischen Phasen (Disklinationen)

Die molekulare Ordnung flüssiger Kristalle läßt sich durch einen Einheitsvektor \vec{L} den „Direktor“ beschreiben, der an jedem Ort des Raumes die Richtung der lokalen Orientierung angibt. In nematischen Phasen ist $\vec{L}(x, y, z)$ parallel zur lokalen optischen Achse.

Die obige Definition der Elastizität in nematischen Phasen beinhaltet die Annahme, daß der Direktor eine stetige Funktion des Ortes ist. Im allgemeinen sind jedoch nematische Phasen von einem System von Linien (Fäden) durchsetzt, in deren Bereich sich die lokale Orientierung unstetig ändert. Diese „Linien der Disklination“ verursachen die typische Fadenstruktur nematischer Phasen. In nematischen Phasen zwischen parallelen Glasplatten, die der Randbedingung \vec{L} parallel zur Glasober-

fläche genügen, verlaufen die Disklinalen senkrecht zwischen den Platten und lassen sich besonders gut beobachten. Man beobachtet in nematischen Phasen 4 Grundtypen von Singularitäten, die durch die Indizes $m = 1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, -1$ zu charakterisieren sind (siehe de GENNES [2], Seite 126 und FRANK [1]). Die Molekülorientierung in der Umgebung der durch $m = \pm 1$ charakterisierten Disklinalen ist in Abb.3 wiedergegeben. Die dünnen Linien geben die Molekülorientierung in

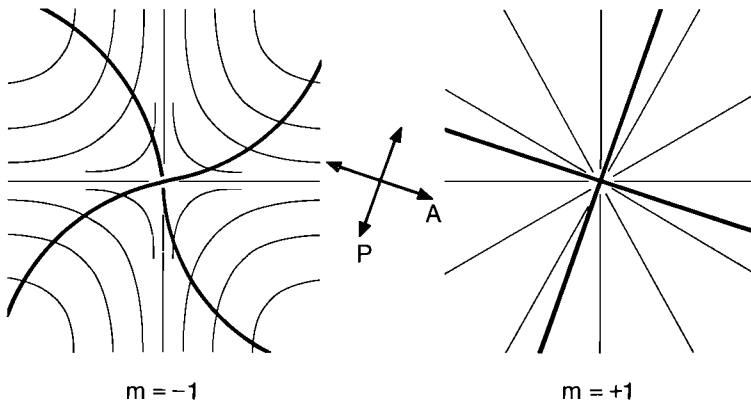


Abb.3. Schema der Molekülanordnung (dünne Linien) in der Umgebung von $m = +1$ und $m = -1$ Disklinalen. Papierebene senkrecht zu Disklinalenlinien. Die dünnen Linien geben Bereiche an, in denen bei Beobachtung zwischen gekreuzten Polarisatoren Auslöschung auftritt

Ebenen senkrecht zu den Disklinalenlinien wieder. Die dicken Linien zeigen die Bereiche, in denen bei Beobachtung zwischen gekreuzten Polarisatoren Auslöschung auftritt. Auslöschung tritt auf, wenn die lokale optische Achse parallel oder senkrecht zum Polarisator steht.

Solche Disklinalen treten besonders in der sog. Schlierentextur nematischer Phasen auf, die in Abb.4a wiedergegeben ist. Die Bezeichnung Schlierentextur charakterisiert die dunklen Bänder, welche von den singulären Punkten ausgehen. Letztere sind die Auftreffpunkte der Disklinalenlinien auf der Glasoberfläche.

Die Molekülorientierung im Bereich solcher Schlieren ist in Abb.4b schematisch wiedergegeben. Man erkennt: Von ganzzahligen Singularitäten ($m = +1, m = -1$) gehen 4 „Bänder“ aus. Aus den halbzahligen Singularitäten entspringen nur 2 Bänder.

Wie im zweiten Teil des Filmes zu sehen ist, beobachtet man in unmittelbarer Nähe der Singulationslinien noch ein System konzentrischer dunkler Ringe. In manchen

Fällen sind die Ringe kreisförmig, in anderen sind sie von mehr rechteckiger Form. Die Singularitäten mit $m = +1$ sind den kreisförmigen Ringen, die Singularitäten mit $m = -1$ den rechteckigen Ringen zuzuordnen.

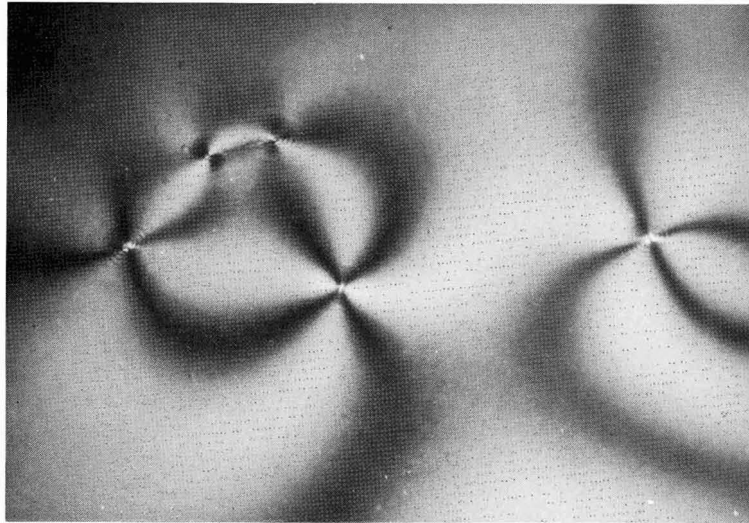


Abb. 4a. „Schlierentextur“ von MBBA zwischen gekreuzten Polarisatoren. Molekülorientierung parallel zu Papierebene (oder Glasplatten). Polarisator unter 45° gegen Vertikale geneigt. Die dunklen „Bänder“ entstehen in Bereichen, wo die lokale optische Achse parallel oder senkrecht zum Polarisator ist. (Vergrößerung $150\times$)

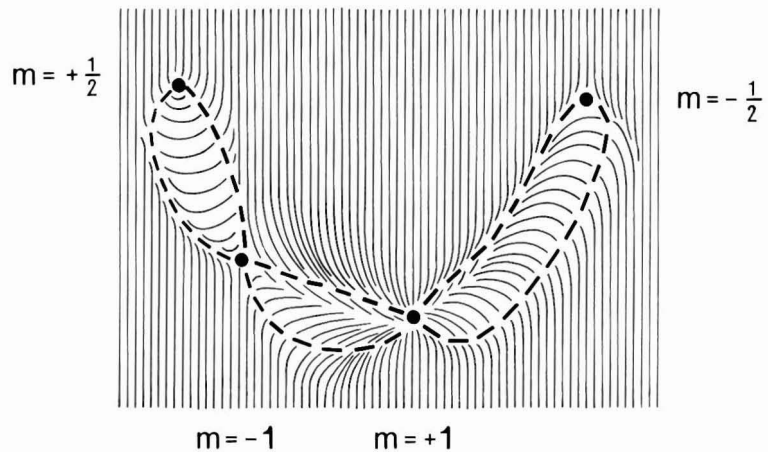


Abb. 4b. Molekülorientierung im Bereich der Schlieren in einer orientierten nematischen Schicht. Dargestellt ist eine Kombination von Singularitäten mit (von links nach rechts) $m = 1/2, -1, +1, -1/2$ (nach NEHRING und SAUPE [4]). Die gestrichelten Linien geben schwarze „Bänder“

Kräfte zwischen Singularitäten (Elektrostatistisches Analogon)

Legt man in die parallel zu den Glasplatten orientierte nematische Schicht ein Koordinatensystem (x, y, z) , wo z senkrecht zur Glasoberfläche ist, so läßt sich die Molekülorientierung in jedem Punkt der unmittelbaren Umgebung der Disklination durch folgende Gleichungen beschreiben:

$$\operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \Psi = m \cdot \varphi + C_0$$

Dabei ist φ der Winkel zwischen der x -Achse und dem Radiusvektor zu einem betrachteten Aufpunkt. x, y legen den lokalen Direktor $\vec{L} = (x, y, 0)$ fest. Eine Überlagerung von Disklinationslinien an den Punkten $P_i = P_i(x_i, y_i)$ läßt sich dann durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n m_i \operatorname{arctg} \frac{y - y_i}{x - x_i}$$

wo x_i, y_i die Lage der Singularität angibt.

In den Singularitäten ist infolge der Deformation des Direktorfeldes elastische Energie gespeichert. Zwischen zwei Singularitäten i und j besteht eine Wechselwirkungsenergie der Größe

$$G_{ij} = -\frac{K}{2} m_i m_j \frac{(\vec{a}_i - \vec{a}_j)^2}{(\vec{r} - \vec{a}_i)(\vec{r} - \vec{a}_j)}$$

wobei $K \approx k_{11}, \approx k_{22}, \approx k_{33}$

Daraus folgt offenbar, daß zwischen den Singularitäten eine Kraft

$$K_{ij} = -2\pi k d \cdot m_i m_j \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^2}$$

wirken muß.

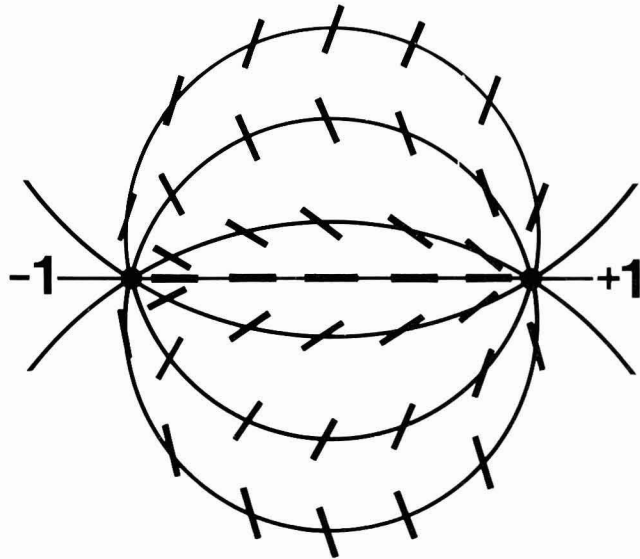
Dies ist ein sehr bemerkenswertes Ergebnis. Die Punkt-Singularitäten verhalten sich bezüglich ihrer Wechselwirkung offenbar wie elektrische Ladungen: Zweidimensionalen Singularitäten entgegengesetzten Vorzeichens (von m) ziehen sich an, solche mit gleichen Vorzeichen stoßen sich ab. Wegen der Anziehung beobachtet man häufig die Verschmelzung von Singularitäten verschiedenen Vorzeichens. Dabei heben sich die Disklinationslinien paarweise auf. Diese Anziehung der Singularitäten und der Verschmelzungsprozeß, der zur Ausheilung von Defekten führt, sind im 2. Teil des Filmes dargestellt.

Zwischen zwei benachbarten Disklinationen lassen sich die Kurven gleicher Molekülorientierung leicht feststellen. Für Disklinationen mit verschiedenen Vorzeichen ($m = \pm 1$) haben diese Kurven die in Abb.5 angegebene Form. Sie verlaufen in völliger Analogie zu den Feldlinien eines elektrischen Dipols.

Elektrische Instabilitäten

Das Verhalten nematischer Flüssigkeiten in elektrischen Feldern ist bestimmt durch die hohe Anisotropie der Dielektrizitätskonstante ϵ und der Leitfähigkeit σ .

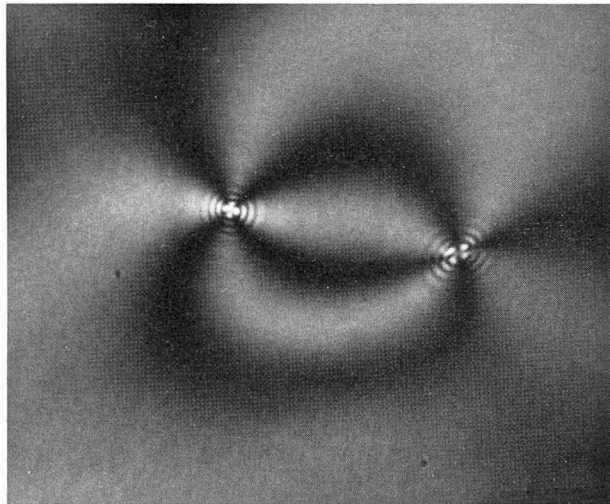
Die Anisotropie der dielektrischen Konstanten kann durch Variation der molekularen Struktur entweder zu $\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$ (Cholesteryl-Derivate) oder zu $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$ (MBBA) eingestellt werden. Für MBBA z.B. ist $\epsilon_{\parallel} = 4,7$; $\epsilon_{\perp} = 5,4$. Die Leitfähigkeit ist meistens



a)

Abb.5a. Schematische Darstellung der Linien gleicher Molekülorientierungen zwischen zwei Disklinationen ungleichen Vorzeichens; $m = -1$ und $m = +1$

b. Textur eines Paares singulärer Linien ungleichen Vorzeichens; ($m = +1$, $m = -1$), zwischen gekreuzten Polarisatoren beobachtet. Die dunklen Streifen geben den Verlauf der Linien gleicher Molekülorientierung an, bei denen der Polarisator parallel oder senkrecht zur lokalen optischen Achse orientiert ist (Vergrößerung $150 \times$)



b)

in Richtung parallel zur lokalen optischen Achse (\vec{L}) am größten ($\sigma_{\parallel} > \sigma_{\perp}$) (MBBA: $\sigma_{\parallel} / \sigma_{\perp} \sim 1,5$). Die Leitfähigkeit ist empfindlich von Verunreinigungen abhängig. Im Zusammenhang mit elektrooptischen Effekten sind flüssige Kristalle mit $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$ (negative dielektrische Anisotropie) und $\sigma_{\parallel} > \sigma_{\perp}$ von besonderem Interesse. Ein Beispiel für solche nematische Phasen ist MBBA.

Zur Beobachtung der elektrooptischen Effekte bringt man den Flüssigkristall zwischen zwei lichtdurchlässige Elektroden. Als solche benützt man SnO_2 beschichtete Glasplatten. Bei Anlegen eines elektrischen Gleichfeldes (oder eines niederfrequenten Wechselfeldes) beobachtet man die im folgenden kurz beschriebenen Effekte:

Homogene Orientierung: Diese wird bei kleinen Spannungen beobachtet (el. Feld $\leq 300 \text{ V/cm}$). Da $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$ ist, stellt sich der Direktor \vec{L} senkrecht zur Oberfläche ein.

Williamsdomänen: Erreicht die Spannung einen kritischen Wert V_k (typischer Wert der Feldstärke: 2000 V/cm), so beobachtet man eine periodische Deformation der homogen orientierten Schicht, die sog. Williamsdomänen (Abb. 6a). Unmittelbar oberhalb der Schwellspannung bildet sich ein scheinbar statisches Streifenmuster aus. Bei weiterer Erhöhung des elektrischen Feldes wird das Streifenmuster instabil. Die Williamsdomänen sind dynamische Deformationen. Durch Einlagerung von Kohleteilchen läßt sich eine Zirkularströmung sichtbar machen. Die Achsen der Zirkularströmung haben dieselbe Orientierung wie das Streifenmuster. Der Verlauf der Molekülorientierung und die Zirkulationsströmung sind in Abb. 6b schematisch dargestellt. Die periodische Deformation ist eine Folge der im Flüssigkristall auftretenden elektrischen, elastischen und viskosen Kräfte. Sie läßt sich wie folgt verstehen (s. Abb. 6 und Abb. 7 und HELFRICH [3]).

Bei kleinen, äußeren, elektrischen Feldern E_0 werden die Moleküle zunächst in eine Richtung parallel zu den Glasplatten orientiert. Diese homogene Orientierung kann durch Reiben der Glasplatte in eine definierte Richtung bewirkt werden. Diese sei die x -Achse. Die Ausbildung der Domäne beginnt mit einer Störung der homogenen Molekülorientierung (parallel zur x -Achse), die zu einer periodischen Deformation in Richtung der x -Achse führt (siehe Abb. 6b und Abb. 7). In Bereichen, in denen der lokale Direktor, \vec{L} , infolge dieser spontanen Fluktuation gegen die Ebene der Glasplatten geneigt ist, findet als Folge der anisotropen Leitfähigkeit ($\sigma_{\parallel} > \sigma_{\perp}$) ein Stromfluß in x -Richtung statt. Dieser Stromfluß führt zum Aufbau einer periodischen Raumladung in x -Richtung (s. Abb. 7). Dadurch wird das elektrische Feld in den Bereichen zwischen den Raumladungen gegen die Normale geneigt ($\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_x$). Da die Molekülorientierung dem Feld folgt, wird die Amplitude der ursprünglich kleinen periodischen Störung noch erhöht.

Das äußere Feld E_0 greift nun an den Raumladungen an und führt durch einen Mitführungseffekt zur Bildung der Zirkulationsströmung. Die Zirkulationsströmung führt zur Ausbildung eines hydrodynamischen Drehmoments, welches die periodische Deformation weiter verstärkt. Die im Flüssigkristall auftretenden Drehmomente (in Richtung der y -Achse) sind im einzelnen:

Mechanisches Drehmoment: Im Bereich, in dem der Direktor \vec{L} um einen Winkel θ gegen die Ebene der Glasplatte geneigt ist, tritt ein elastisches Rückstellmoment, M_{mech} , auf. Dieses ist mit guter Näherung gegeben durch

$$M_{\text{mech}} \approx k_{11} \frac{\vartheta}{\lambda^2} \approx k_{11} \frac{\vartheta}{d^2}$$

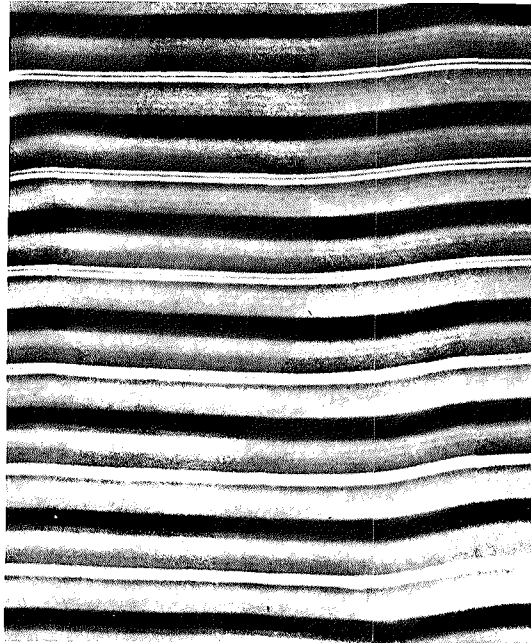
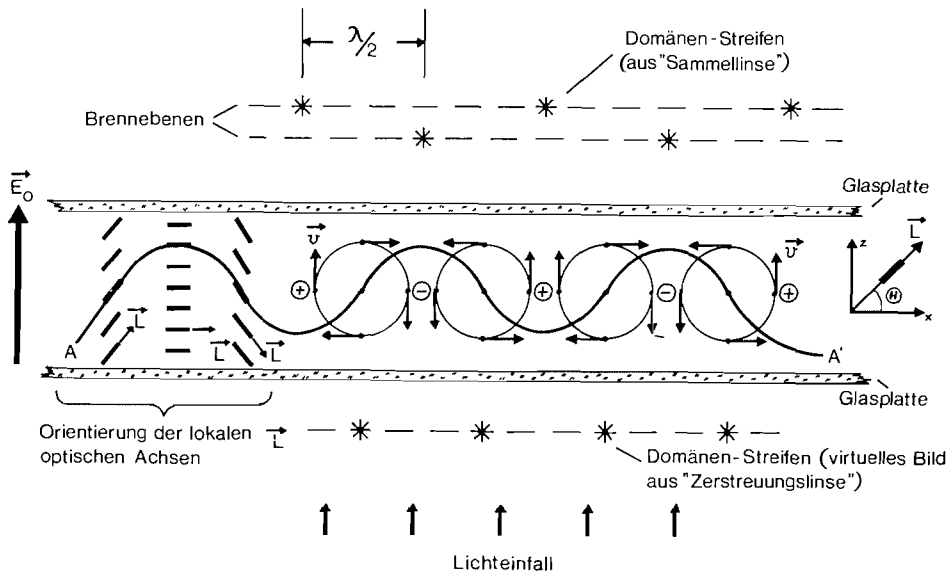


Abb. 6a. Williamsdomänen in MBBA. Der Flüssigkristall war in einer Richtung senkrecht zu den Streifen orientiert (Vergrößerung 150 ×).

b. Schema des Deformations- und Fließmusters bei der Ausbildung von Williamsdomänen. Die Sinus-Linie AA' gibt die Orientierung der Moleküle an. Die ursprüngliche Orientierung des Direktors ist parallel zur x-Achse

Kreise: Geschwindigkeitsfeld \vec{v} der Zirkulationsströmung. (⊕; ⊖): Raumladungen, die sich als Folge der Leitfähigkeitsanisotropie aufbauen
Die Linsenwirkung ist eine Folge der periodischen Variation der optischen Dichte in horizontaler Richtung infolge der Änderung in der Molekülorientierung. Abstand der Streifen: $\lambda/2$



Das zweite Gleichheitszeichen folgt aus dem experimentellen Befund, daß die Wellenlänge λ der periodischen Deformation annähernd gleich der Schichtdicke d ist.

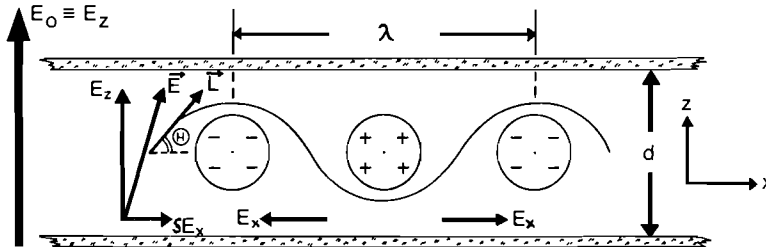


Abb. 7. Ausbildung der Raumladung, die zur Zirkulationsströmung, zur Williamsdomäne führt. Die Amplitude periodischer Störung kann dargestellt werden als $\cos \frac{2\pi x}{\lambda}$

Die Wellenlänge ist annähernd gleich der Schichtdicke d

Dielektrisches Drehmoment: Das durch die Raumladung erzeugte Feld in x -Richtung ist proportional zum angelegten Feld $E_0 \equiv E_z$

$$E_x \approx \epsilon_0 (\epsilon_{11} - \epsilon_1) \Theta E_z$$

Folglich ist die elektrische Polarisation \vec{P} der Raumladung $\vec{P} \approx \epsilon_{11} \vec{E}_x$ und das Drehmoment wird

$$M_{el} \approx \epsilon_0 \epsilon_{11} (\epsilon_{11} - \epsilon_1) E_z^2 \cdot \Theta$$

Hydrodynamisches Drehmoment: Infolge der Zirkulationsströmung tritt ein hydrodynamisches Drehmoment auf. Nach HELFRICH [3] ist dieses ebenfalls proportional zum Quadrat der angelegten el. Feldstärke E_z .

$$M_{hydro} \approx const \cdot E_z^2 \cdot \Theta$$

Es ist klar, daß im stationären Zustand die 3 Drehmomente im Gleichgewicht sein müssen.

Mit $M_{mech} + M_{el} + M_{hydro} = 0$ folgt für die kritische Schwellspannung, V_c der Williamsdomänen

$$V_c^2 = E_c^2 d^2 = const \cdot k_{11}$$

In Übereinstimmung mit der Beobachtung ist also die Schwellspannung V_c von der Schichtdicke unabhängig. Diese Konstanz der Schwellspannung wird in dem 2. Teil des Filmes experimentell verifiziert.

Dynamischer Streubereich: Wird die Spannung über V_c hinaus erhöht, so wird das Streifenmuster instabil. Die Williamsdomänen werden beweglich, und die

Zirkularströmung geht in eine Turbulenz über. Dieser dynamische Zustand des Flüssig-Kristalls führt zu extrem starker Lichtstreuung. Diese sog. dynamische Streuung ist die Folge einer sehr schnellen Fluktuation in der Orientierung des Direktors \vec{L} .

Zur Entstehung des Films

1. Versuchsdurchführung:

Alle Versuche wurden mit der Flüssigkristallsubstanz MBBA N-(p-Methoxy-benzyliden)-p-n-butylanilin durchgeführt. Der bei Raumtemperatur flüssig kristalline Zustand der Substanz ermöglicht es, sie ohne vorherige thermische Behandlung in die Zelle einzubringen.

Den Aufbau der Flüssigkristallzelle zeigt Abb. 8.

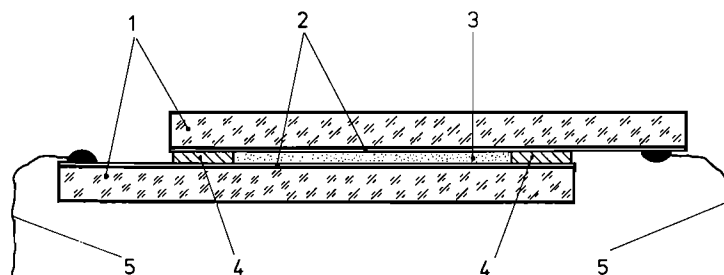


Abb. 8. Flüssigkristall-Zelle (schematischer Aufbau)

1: Glasplatten; 2. Zinnoxid-Beschichtung; 3: Flüssigkristall; 4: Distanzstücke aus polymerem Material; 5: Aufgelötete Zuleitungsdrähte

Zwischen zwei parallelen Glasplatten, deren Innenseiten mit Zinnoxid beschichtet und damit elektrisch leitend gemacht wurden, befindet sich der Flüssigkristall. Distanzstücke aus polymerem Material halten die Dicke der aktiven Schicht auf etwa $20\ \mu\text{m}$. Über Zuleitungsdrähte läßt sich im Innern der Zelle ein gleichförmiges elektrisches Feld erzeugen. Die Flüssigkristallzelle stellt einen Plattenkondensator dar, bei dem die Flüssigkristall-Substanz das Dielektrikum bildet.

Um die Bildung und Auflösung der Williamsdomänen zu demonstrieren, mußte ein Wechselfeld sehr gleichmäßig von ca. $3000\ \text{V/cm}$ auf ca. $9000\ \text{V/cm}$ erhöht werden. Dies geschah durch die lineare Erhöhung der Ausgangsspannung eines Netzgerätes mit Hilfe eines stark unteretzten Getriebemotors.

Bei der Bildung und Auflösung der Disklinationen wurde die Spannung von einem hohen Wert, der schon die „dynamische Streuung“ auslöste, auf einen niedrigeren Wert gebracht.

2. Aufnahmetechnik:

Für die Filmaufnahmen wurde die Kamera ARRITECHNO 35 mit Normalfilm Eastman Color Negativ Typ 5254 verwendet. Der Antrieb der Kamera erfolgte von einem Spezialantrieb, der die Bildfrequenzen von 2 B/s und 4 B/s ermöglichte.

Als Mikroskop kam das Zeiss-Stativ WL mit den Zeiss LD-Epiplan-Pol bzw. Epiplan-Pol Objektiven 40/0.60, 16/0.30, 8/0.20 und dem Fotokompensokular FK 5 × zum Einsatz. Die Kamera mit dem Strahlenteiler wurde soweit über dem Okular befestigt, daß sich, entsprechend dem eingesetzten Objektiv, in der Filmebene jeweils ein Objektfeld von 200 µm, 480 µm oder 1000 µm Breite abbildete. Die Beleuchtung erfolgte nach dem Durchlicht-Hellfeldverfahren mit gekreuzten Polfiltern. Als Lichtquelle wurde eine Halogenlampe 15 V/150 W in mikroskopischer Beleuchtungsanordnung verwendet.

Filmbeschreibung

Wortlaut des gesprochenen Kommentars¹

MBBA

N-(p-Methoxy-benzyliden)-p-n-butylanilin

Temperatur 25° C; Schichtdicke etwa 20 µm; 2 B/s.

Bildung und Auflösung von Williamsdomänen

Steigende Wechselfelder (3000 V/cm – 9000 V/cm)

Bildfeldbreite 480 und 200 µm

1. Bei der 1. Einstellung erkennt man zunächst die homogen orientierte Phase, die bei kleinen Feldstärken stabil ist. Das gesamte Gesichtsfeld ist gleichermaßen hell. Mit steigender Feldstärke erscheint von rechts oben ein Streifenmuster parallel orientierter Williamsdomänen, die schließlich das gesamte Gesichtsfeld bedecken. Streifenmuster besteht aus einem System heller und dunkler Streifen. Die hellen Streifen liegen in den Brennpunkten der „Zylinderlinsen“. Der Streifenabstand ist unabhängig von der Feldstärke. Bei weiterer Spannungserhöhung beginnen sich die Streifen von links unten her zu deformieren. Die Domänen zerfallen in fluktuierende kleine Bereiche. Es entsteht das mikroskopische Bild der dynamischen Streuung.

Die homogene Schicht wird unter dem Einfluß eines steigenden Wechselfeldes in ein Streifenmuster umgeformt.

Diese sog. „Williamsdomänen“ werden zuerst links unten instabil.

Bei maximaler Feldstärke geht fast die ganze Schicht in die dynamische Streuung über.

2. In der zweiten Einstellung wird der Vorgang mit einer neuen Probe wiederholt: Hier entstehen die Domänen abrupt im gesamten Gesichtsfeld. Die hellen Streifen in der Brennebene des Systems von Zylinderlinsen sind besonders scharf zu sehen. Das Streifenmuster bleibt über einen weiten Spannungsbereich stabil. An 2 Stellen enthält das Streifenmuster einen Knick, sog. „Versetzungen“. Bei weiterer Spannungserhöhung wird das Streifenmuster instabil und zerfällt in ein ziemlich regelmäßiges strickmusterartiges Domänensystem. Dieses System geht bei weiterer Spannungserhöhung schließlich in die dynamische Streuung über.

¹ Die *Kursiv*-Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film. – Die eingerückten Abschnitte in Kleindruck geben zusätzliche Informationen.

Aus dem homogenen Zustand bilden sich wieder Williamsdomänen.

Zwei Versetzungen links unten laufen diagonal nach oben.

An diesen Versetzungen bilden sich zuerst strickmusterartige Strukturen aus.

Eine weitere Erhöhung der Feldstärke führt dann zur dynamischen Streuung.

3. In der dritten Einstellung ist das Streifenmuster der Williamsdomänen in kleiner Vergrößerung wiedergegeben. Das Muster enthält mehrere Versetzungen, die langsam durch das Gesichtsfeld laufen. Bei weiterer Spannungserhöhung entsteht wieder eine strickmusterartige Textur. Diese entsteht, da die hellen Streifen sich wellenförmig deformieren. Die Geschwindigkeit der bei weiterer Spannungserhöhung entstehenden Turbulenz (dynamische Streuung) ist relativ klein.

Auch diese Übersichtsaufnahme zeigt die Bildung zahlreicher, zunächst stabiler Williamsdomänen.

Die Zahl der Versetzungen nimmt mit steigender Feldstärke zu.

Bildung der strickmusterartigen Struktur.

Beginn der dynamischen Streuung.

4. Die 4. Einstellung zeigt nochmals die hohe Stabilität der Williamsdomänen gegen Änderung der Spannung. Der Streifenabstand bleibt über einen weiten Spannungsbereich weitgehend konstant.

Bei höherer Vergrößerung sind die Details besser zu erkennen.

Williamsdomänen mit Versetzungen.

Strickmusterartige Struktur.

Beginn der dynamischen Streuung.

5. In der 5. Einstellung soll die scharfe Fokussierung der „Zylinderlinse“ demonstriert werden. Es wird außerdem eine Instabilität gezeigt, bei der die Streifen abrupt gegeneinander verschoben werden.

Hier bilden sich weniger stabile Domänen aus, die ständig gegeneinander verschoben werden.

Bei Felderhöhung wird dieser Vorgang verstärkt, und es kommt zur dynamischen Streuung.

Steigendes und fallendes Wechselfeld (5000 V/cm \rightleftharpoons 7500 V/cm)

Bildfeldbreite 200 μ m

6. In dieser Einstellung wird die Reversibilität der Domänenbildung gezeigt. Das Streifenmuster bildet sich aus den Fluktuationen der dynamischen Streuung zurück. Die Wellenlänge von ca. 40 μ m bleibt bei der Rückkehr aus der dynamischen Streuung erhalten.

Eine Felderhöhung führt zu den schon bekannten Williamsdomänen.

Dynamische Streuung bei maximaler Feldstärke.

Bei abnehmendem Feld bildet sich wieder der gleiche Streifenabstand aus.

Steigendes Gleichfeld (0 V/cm \rightarrow 6000 V/cm)

Bildfeldbreite 480 μ m

7. In dieser Sequenz ist die Bildung der Williamsdomänen im elektrischen Gleichfeld dargestellt. Das Streifenmuster zerfällt in ein zweidimensionales Muster. Bei der dynamischen Streuung, die bei hohem Feld entsteht, sind die Fluktuationen auf wenige Bereiche lokalisiert.

Auch bei einem steigenden Gleichfeld entstehen Williamsdomänen.

Sie zerfallen in das strickmusterartige System, das über einen großen Spannungsbereich stabil bleibt. Schließlich beginnt bei maximaler Feldstärke die dynamische Streuung an spezifischen Stellen – andere Teile bleiben ruhig.

Feldinduzierte Bildung und Auflösung von Disklinationen

Fallende Wechselfelder

Bildfeldbreite 1 000 μm ; 4 B/s

8. In diesem Teil des Films ist die Entstehung und Ausheilung von Disklinationen in einer homogen orientierten, nematischen Schicht dargestellt. Eine hohe Dichte an Disklinationen wird durch ein elektrisches Feld erzeugt.

Die Einstellung beginnt bei Spannungen oberhalb der Schwellspannung der dynamischen Streuung.

Unmittelbar nachdem die Fluktuationen nach Reduktion des Feldes eingefroren sind, ist das gesamte Gesichtsfeld mit den im Abschnitt I beschriebenen Disklinationen besetzt. Die dichtbeieinanderliegenden Disklinationen verschmelzen sehr schnell. Es bleiben schließlich 3 Linienpaare übrig. Die singulären Punkte sind durch dunkle Streifen verbunden, die wie Feldlinien im Bereich elektrischer Dipole angeordnet sind. Manche der Linien laufen zu anderen Paaren von singulären Punkten. Man erkennt deutlich, wie manche Punktpaare infolge der besprochenen gegenseitigen Anziehung aufeinander zulaufen. Das rechts im Bild erscheinende Paar von Disklinationen verschmilzt schließlich.

Dynamische Streuung.

Durch Verminderung des Feldes entsteht ein System von Disklinationen, die durch dunkle Streifen verbunden sind und sich zum Teil schnell auslösen.

Es bleiben drei Paare übrig.

Die Disklinationen des Paares rechts unten ziehen sich an.

Sie laufen immer schneller aufeinander zu und löschen sich gegenseitig aus.

9. In der zweiten Einstellung wird der Vorgang der Bildung eines Musters von singulären Punkten durch „Einfrieren“ der dynamischen Streuung wiederholt. Die im Bild links unten erscheinende Gruppe von 4 singulären Punkten verschmilzt simultan.

Dynamische Streuung.

Ausbildung zahlreicher Disklinationen.

Am linken Bildrand laufen vier miteinander verbundene Disklinationen aufeinander zu – und löschen sich aus.

Man spricht von einer „Ausheilung“.

Die anderen beiden Paare bleiben stabil.

10. In der dritten Einstellung wird das elektrische Feld stufenweise verringert. Hier ist ein teilweise sprunghaftes Verschmelzen von Disklinationenpaaren zu sehen.

Bei diesem letzten Versuch wird das Wechselfeld zunächst kontinuierlich – später stufenweise vermindert.

Die Spannungssprünge haben eine plötzliche Farbänderung zur Folge.

English Version of the Spoken Commentary¹

MBBA

N-(p-Methoxy-benzyliden) -p-n-butylanilin

Temperatur 25° C; Schichtdicke etwa 20 µm; 2 B/s

Bildung und Auflösung von Williamsdomänen

Steigende Wechselfelder (3000 V/cm → 9000 V/cm)

Bildfeldbreite 480 und 200 µm

(Formation and Dissolution of Williams domains Alternating Fields Increasing)
Under the influence of an alternating electric field, the homogeneously orientated film is transformed into a pattern of parallel strips. These so called “Williams domains” first become unstable at the lower left-hand corner. At maximum field strength, the whole plane of vision exhibits dynamic scattering.

Williams domains develop again from the homogeneously orientated structure. Two dislocations move diagonally from the lower left-hand corner to the upper left-hand corner.

From these dislocations of the strips, a knitting pattern evolves.

A further increase in field strength finally leads to dynamic scattering. This general view shows the formation of Williams domains, which are stable at low field strength.

The number of disinclinations increases with increasing field strength.

Formation of knitting pattern.

Onset of dynamic scattering.

More details can be seen at higher magnification.

Williams domains with disinclinations.

Formation of knitting pattern.

Start of dynamic scattering.

A less stable strip pattern is formed.

The strips continually move in relation to one another.

This motion intensifies with increasing field strength.

Finally dynamic scattering occurs.

Steigendes und fallendes Wechselfeld (5000 V/cm ⇌ 7500 V/cm)

Bildfeldbreite 200 µm

(Increasing and Decreasing Alternating Field)

Increase in field strength leads to the formation of Williams domains.

Dynamic scattering at maximum field strength.

With decreasing field strength, the strip pattern with the original spacing between strips is resumed.

¹ The passages in *italics* correspond with the subtitles in the film.

Steigendes Gleichfeld (0 V/cm → 6000 V/cm)

Bildfeldbreite 480 µm

(Increasing Constant Film)

Williams domains are also formed with an increasing constant field.

They decompose into a knitting pattern which is stable over a large voltage range.

Finally, at maximum field strength the dynamic scattering starts at specific sites.

Other parts remain static.

Feldinduzierte Bildung und Auflösung von Disklinationen

Fallende Wechselfelder

Bildfeldbreite 1000 µm; 4 B/s

(Field-Induced Formation and Dissolution of Disinclinations Alternating Fields Decreasing)

Dynamic scattering.

By decreasing the field strength, a system of paired disinclinations connected by dark strips is formed. Most of these structures dissolve rapidly.

Three pairs of disinclinations remain.

The disinclinations of the pair at the lower right-hand corner attract one another.

They approach mutually with increasing speed and finally extinguish each other.

Dynamic scattering.

Formation of a large number of disinclinations.

On the extreme left, four connected disinclinations approach each other – and extinguish mutually.

This is a so called “healing process”.

The two other pairs of disinclinations remain stable.

In this last experiment the alternating field is increased continuously. – Then the voltage is reduced step-wise. The voltage jumps are accompanied by sudden changes of colour.

Literatur

- [1] FRANK, F. C.: Disc. Faraday Soc. 25 (1958), 1.
- [2] GENNES, P. G. de: “The Physics of Liquid Crystals”. Clarendon Press, Oxford 1974.
- [3] HELFRICH, W.: J. Chem. Phys. 51 (1969), 4092.
- [4] NEHRING, J., und A. SAUPE: J. Chem. Soc.
- [5] OSEEN, C. W.: Trans. Farad. Soc. 29 (1933), 883.

Filmveröffentlichung

- [6] SACKMANN, E., und INST. WISS. FILM: Flüssige Kristalle – Thermisch und elektrisch induzierte Texturänderungen bei cholesterischen Phasen. Film E 2140 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von E. SACKMANN, G. HUMMEL und J. THIENEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 3, Nr. 20/E 2140 (1977), 18 S.

Abbildungsnachweis

Abb. 1–8: E. SACKMANN.