

Phasenvielfalt und Farbenspiel

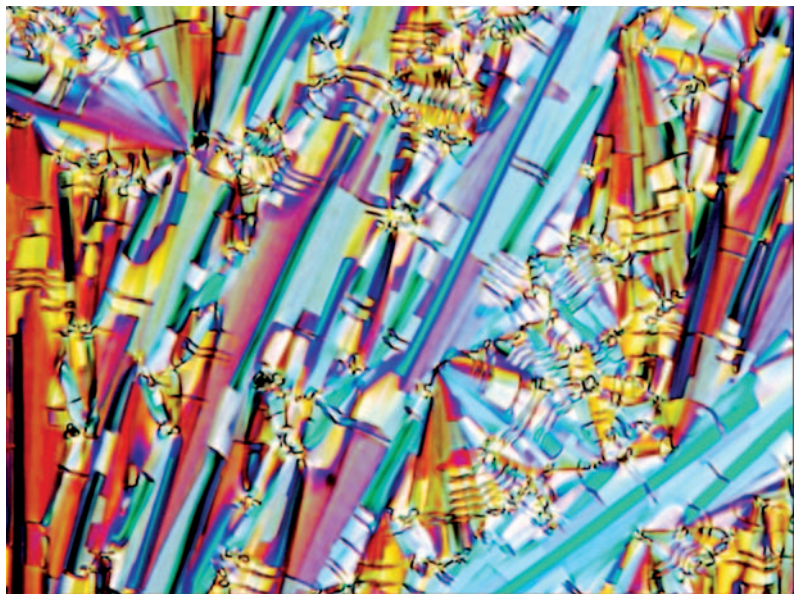
Flüssigkristalle eignen sich für Displays, Demonstrationsexperimente und als Modellsysteme.

Ingo Dierking

Flüssigkristalle und LCDs – wer kennt sie nicht? Mittlerweile sind wohl ein Dutzend davon in jedem Haushalt zu finden. Von den kleinen, einfachen Anzeigen in Armbanduhren und Taschenrechnern bis hin zu den komplizierten Bildschirmen in Monitoren und Flachbildfernsehern. Neben diesen allgegenwärtigen Anwendungen bieten Flüssigkristalle auch jede Menge spannende Physik und faszinieren zudem mit ästhetisch sehr reizvollen Strukturen.

Im Jahr 1888 untersuchte der österreichische Botaniker Friedrich Reinitzer Derivate von Cholesteryl, das er aus Karotten gewonnen hatte. Dabei entdeckte er eine Substanz „mit zwei Schmelzpunkten“. Dieses Cholesterylbenzoat schmilzt von seiner kristallinen Form zunächst in eine milchige Flüssigkeit und bei noch höheren Temperaturen, dem sog. Klärpunkt, in eine transparente Flüssigkeit (Abb. 1). Reinitzer verstand seine Entdeckung zunächst nicht und wandte sich an Otto Lehmann, den Nachfolger von Heinrich Hertz in Karlsruhe. Dieser Spezialist für Kristall- und Polarisationsmikroskopie prägte bereits ein Jahr später den Begriff des Flüssigkristalls, womit er nicht bei allen Kollegen auf Zustimmung stieß. Heute wissen wir natürlich, dass Lehmann völlig Recht damit hatte, diese Substanzen als eigenständige thermodynamische Phasen anzusehen. Die milchige Flüssigkeit ist demnach eine solche flüssigkristalline Phase. In ihr existieren Domänen verschiedener Längenskalen mit unterschiedlichem Brechungsindex, die sichtbares Licht streuen – daher der milchige Eindruck.

Flüssigkristalle sind anisotrope Fluide, die thermodynamisch zwischen dem dreidimensionalen Kristall und der isotropen Flüssigkeit angesiedelt sind [1–3]. Bei ihnen handelt es sich um selbstorganisierte, teilgeordnete Systeme, die sich im Grad ihrer Ordnung unterscheiden. Damit Moleküle eine solche flüssigkristalline Phase ausbilden können, müssen sie eine gewisse Formanisotropie aufweisen: Häufig sind sie stäbchenförmig, seltener scheibchenförmig. Die Moleküle besitzen dabei einen relativ starren, polarisierbaren Mittelteil und haben flexible Endgruppen (Abb. 2). An dieser Stelle sei angemerkt, dass wir uns hier ausschließlich mit *thermotropen* Flüssigkristallen beschäftigen, also solchen, die den flüssigkristallinen Zustand über Temperaturänderung erreichen. Eine weitere Klasse von Flüssigkristallen, die einen eigenen Überblicksartikel



Ein Flüssigkristall vereinigt die Eigenschaften eines Kristalls mit denen einer Flüssigkeit und verwandelt sich im polarisierten Licht zu einem wahren Kunstwerk.

rechtfertigen würde, sind die *lyotropen* Phasen, die sich durch Konzentrationsänderung amphiphiler Moleküle in einem Lösungsmittel, üblicherweise Wasser, ausbilden. Waschmittel bei hoher Konzentration in Wasser sind ein Beispiel dafür.

Mit der molekularen Anisotropie, die zur Ausbildung der flüssigkristallinen Phasen beiträgt, geht auch eine Anisotropie der physikalischen Eigenschaften einher. Ein Beispiel ist die Doppelbrechung, die sich zwischen gekreuzten Polarisatoren nachweisen lässt (Abb. 3). Der Flüssigkristall vereint die Eigenschaften eines Kristalls mit denen einer Flüssigkeit in einem

KOMPAKT

- Als „weiche Materie“ bieten Flüssigkristalle weit mehr als die übliche Anwendung in Displays. Sie sind ideale Systeme z. B. für die Untersuchung von universellen Wachstumsexponenten, fraktaler Strukturbildung, Domänenvergrößerung sowie der Vernichtung von topologischen Defekten.
- Aktuelle Untersuchungen haben somit Einfluss auf Gebiete der Festkörperphysik, der nichtlinearen Dynamik bis hin zu kosmologischen Theorien.
- Neue, auf Flüssigkristallen basierende Materialien und Composite werden derzeit entwickelt, die künftig in Anwendungen der Photonik und als Sensoren zum Einsatz kommen können.

Dr. Ingo Dierking,
School of Physics
and Astronomy,
Oxford Road,
Schuster Building,
Manchester M13 9PL,
Großbritannien



Abb. 1 Eine nematisch flüssigkristalline Phase streut Laserlicht stark (links). Wenn man den Flüssigkristall bis in die isotrope Phase erwärmt, verschwindet die Milchigkeit, die Flüssigkeit wird klar (rechts).

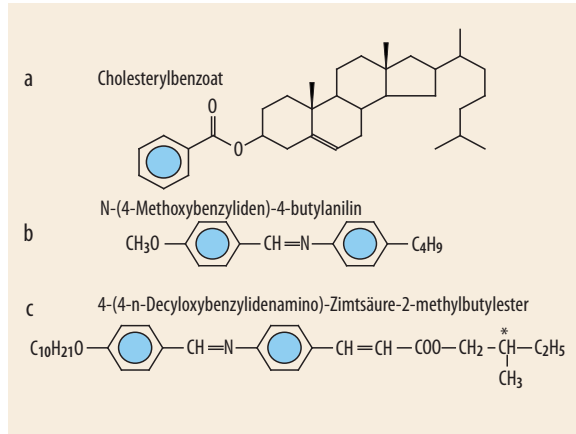


Abb. 2 Flüssigkristalle, hier drei klassische Beispiele, weisen einen relativ starren und polarisierbaren Mittelteil auf und haben flexible Endgruppen: das von Friedrich Reinitzer entdeckte Cholesterylbenzoat (a), MBBA (b) und der erste ferroelektrische Flüssigkristall DOBAMBC (c).

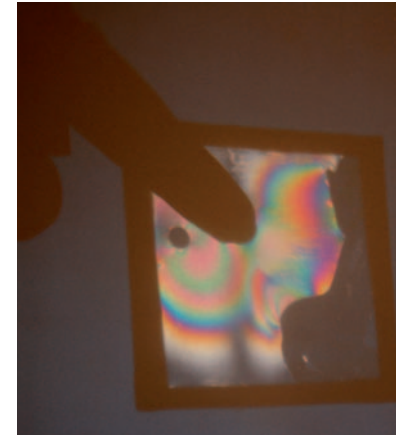


Abb. 3 Ein Flüssigkristall zwischen gekreuzten Polarisatoren zeigt Doppelbrechung. Presst man leicht auf eine solche Zelle, wird deutlich, dass es sich hier wirklich um eine Flüssigkeit handelt.

neuen Zustand der Materie. Dieser unterscheidet sich grundsätzlich von z. B. Ferrofluiden, die aus ferromagnetischen kolloidalen Partikeln in einer isotropen Flüssigkeit bestehen.

Bei den anisotropen physikalischen Eigenschaften sind insbesondere die Anisotropie des Brechungsindex und der dielektrischen Konstanten zu nennen (**Infokasten**), denn auf diesen physikalischen Größen beruhen bislang fast alle Anwendungen von Flüssigkristallen, insbesondere die der LCDs (dazu kommt noch die Tatsache, dass Flüssigkristalle elastisches Verhalten aufweisen).

Ein Zoo von Phasen

Wie bereits erwähnt, zeichnet sich der flüssigkristalline Zustand dadurch aus, dass die formanisotropen Moleküle in ihm geordnet sind. Je nach dem Grad der Ordnung sind inzwischen über 20 thermodynamisch eigenständige flüssigkristalline Phasen bekannt, die durch Phasenübergänge 1. oder 2. Ordnung, d. h. durch diskontinuierliche oder kontinuierliche Übergänge, voneinander getrennt sind. Manche flüssigkristallinen Moleküle (Mesogene) weisen nur eine einzige flüssigkristalline Phase auf, für andere sind je nach Tem-

peratur bis zu zehn verschiedene individuelle Phasen bekannt.

Die einfachste flüssigkristalline Phase und die mit der höchsten Symmetrie ist die nematische Phase (N). Die Bezeichnung nematisch stammt aus dem Griechischen und bedeutet wörtlich „Faden“. Sie geht zurück auf die fadenförmige oder Schlierenstruktur – man spricht von der Textur –, die sich zwischen gekreuzten Polarisatoren unter dem Mikroskop beobachten lässt (**Abb. 4a**). Farbe und Helligkeit der Texturen lassen sich im Wesentlichen durch die Gleichung (1) im **Infokasten** beschreiben. Die nematische Phase weist ausschließlich eine Orientierungsfernordnung der Längsachsen stäbchenförmiger Moleküle auf. Dabei zeigen die Molekül-Längsachsen im Mittel in eine Richtung, die der Direktor n genannt wird; n ist gleichzeitig die optische Achse der nematischen Phase.

Zu den Phasen, die häufig beim Kühlen einer nematischen Phase zu beobachten sind, zählen die fluiden smektischen Phasen, SmA und SmC. Diese Phasen weisen zusätzlich zur nematischen Orientierungsfernordnung eine eindimensionale Positionsfernordnung auf, d. h. die Moleküle bilden Schichten. Innerhalb der smektischen Schichten sind die Molekülschwerpunkte allerdings isotrop verteilt. Fluide smektische Phasen kann man daher als eindimensionale Kristalle oder

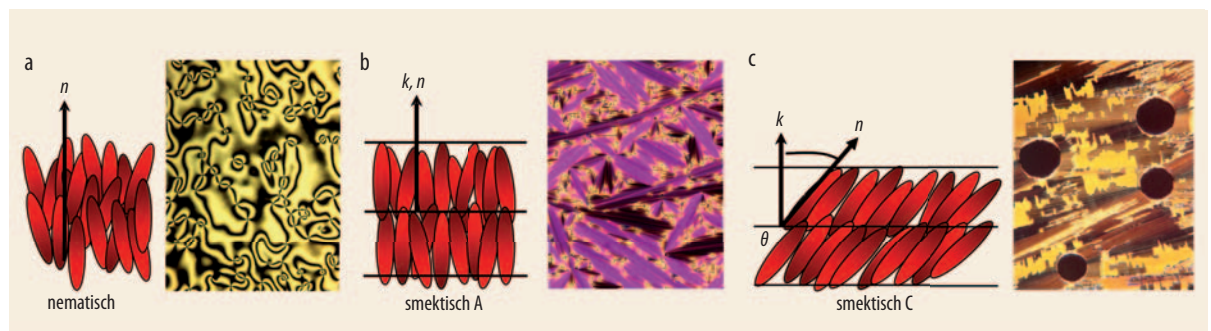


Abb. 4 Die verschiedenen Ordnungen von Flüssigkristallen zeigen im Polarisationsmikroskop typische Texturen, hier

gezeigt für eine nematische (a), eine smektische A- (b) und eine ferroelektrische smektische C*-Phase (c). Die vier

schwarzen Kreise im Teilbild (c) sind Luftblasen, die beim Füllen der Zelle entstanden sind.

auch als zweidimensionale Flüssigkeiten betrachten. Die Bezeichnung smektisch stammt ebenfalls aus dem Griechischen und steht für das Wort „Seife“, da Seifen bei hoher Konzentration in Wasser die bereits erwähnten lyotropen Flüssigkristalle ausbilden.

In der SmA-Phase zeigt der Direktor \mathbf{n} (die optische Achse) entlang der smektischen Schichtnormalen \mathbf{k} (Abb. 4b). Typische Texturen sind Fächertexturen. Der Phasenübergang zur SmC-Phase ist meist zweiter Ordnung. Der Direktor \mathbf{n} neigt sich kontinuierlich mit fallender Temperatur um einen Winkel θ bezogen auf die smektische Schichtnormale \mathbf{k} (Abb. 4c). Die gezeigte Textur ist die einer chiralen SmC-Phase (SmC*) in einer nur wenige Mikrometer dünnen Zelle. In dem Fall weisen die beobachteten Domänen eine spontane Polarisation auf, sie sind ferroelektrisch. Im Gegensatz zu Festkörpern lassen sich diese Domänen sehr einfach visualisieren. Diese Phasen sind die einzigen bislang bekannten fluiden ferroelektrischen Materialien.

Für technische Anwendungen spielt bisher fast ausschließlich die nematische Phase eine Rolle [4, 5]. In LCDs kommen üblicherweise Mischungen aus mehreren Komponenten zum Einsatz, um alle physikalischen Eigenschaften (Doppelbrechung, Viskosität, dielektrische Konstanten, elastische Konstanten etc.) zu optimieren – insbesondere auch die Phasenübergangstem-

peraturen, denn ein Standarddisplay sollte zwischen ca. -20 und 70 °C funktionieren. Solche kommerziellen Mischungen haben üblicherweise die sehr einfache Phasenabfolge von kristallin über nematisch zu isotrop. Einige Nischenanwendungen, wie z. B. Mikrodisplays, setzen ebenfalls ferroelektrische Flüssigkristalle ein mit der Phasenabfolge von kristallin über SmC*, SmA* und N* zu isotrop [5].

Das Auge forscht mit

Ein besonderer Aspekt der Flüssigkristalle ist die überaus ansprechende Ästhetik der Texturen. Mikrofotografien von Flüssigkristallen offenbaren eine Vielfalt von Farbspielen und Strukturen (Abb. 5), anhand derer geübte Betrachter bereits entscheiden können, um welche der diversen flüssigkristallinen Phasen es sich handelt [6]. Die Texturen entstehen durch ein diffiziles Gleichgewicht verschiedener Faktoren. Eine große Rolle spielt Selbstorganisation. Diese wird üblicherweise induziert durch van-der-Waals-Wechselwirkungen sowie die Tatsache, dass sich stäbchenförmige Moleküle wie Baumstämme auf einem See eher parallel als senkrecht zueinander orientieren. Außerdem lässt sich die Molekülorientierung sehr einfach über das Substrat

OPTISCHE EIGENSCHAFTEN

Befindet sich eine Flüssigkristallschicht der Dicke d (typischerweise 10 μm) zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren, so wird ein auf diese Zelle einfallender Lichtstrahl in zwei Komponenten aufgespalten, den ordentlichen Strahl, der dem Snellius'schen Brechungsgesetz folgt, und den außerordentlichen Strahl, der diesem nicht folgt. Beide Strahlen sind senkrecht zueinander polarisiert und erfahren verschiedene Brechungsindizes n_o bzw. n_{ao} , während sie den Flüssigkristall passieren. Dadurch ergibt sich zwischen beiden Strahlen der Gangunterschied

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{ao} - n_o)d,$$

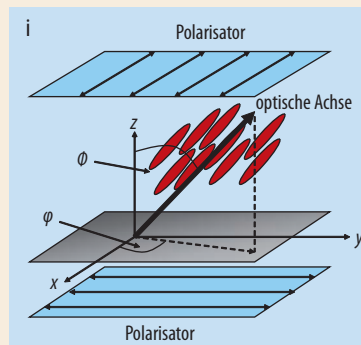
mit der Wellenlänge λ . n_o und n_{ao} hängen mit den Brechungsindizes parallel und senkrecht zur optischen Achse (dem Direktor) über $n_o = n_{\perp}$ und

$$n_{ao} = n_{\parallel} n_{\perp} / \sqrt{n_{\parallel}^2 \cos^2 \Phi + n_{\perp}^2 \sin^2 \Phi}$$

zusammen. Dabei ist Φ der Winkel zwischen der optischen Achse und der Ausbreitungsrichtung des Lichts (Abb. i). Die transmittierte Intensität ist gegeben durch

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

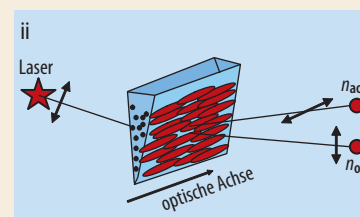
wobei φ der Winkel ist zwischen der Richtung des Analysators und der Projektion der optischen Achse auf die Ebene senkrecht zur Richtung der Lichtausbreitung.



Im Hinblick auf die Texturbilder impliziert der erste sin-Faktor der Gleichung, dass man keine Transmission beobachtet, das Texturbild also schwarz ist, wenn immer das Direktorfeld $\mathbf{n}(\mathbf{r})$, also die lokale optische Achse, entlang eines der Polarisatoren orientiert ist. Der zweite sin-Faktor hängt von der Wellenlänge ab und beeinflusst die Farbe der Texturbilder. Er impliziert auch, dass Probenregionen schwarz erscheinen, wenn die optische Achse parallel zur Richtung der Lichtausbreitung orientiert ist, $\Delta n = 0$.

Die dielektrische Anisotropie, meist $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} > 0$, ist auch verantwortlich für die Umorientierung der optischen Achse von Flüssigkristallen durch Anlegen von elektrischen Feldern. Dadurch lässt sich zwischen gekreuzten Polarisatoren die Intensität des transmittierten Lichts kontrollieren.

Flüssigkristalle ermöglichen sehr schöne Demonstrationsexperimente zur Doppelbrechung und Polarisation. Beleuchtet man eine Keilprobe eines nematischen Flüssigkristalls mit einem einfachen HeNe-Laser, so kann man ordentlichen und außerordentlichen Strahl auf eine weiße Wand oder einen Schirm projizieren (Abb. ii). Wenn der Abstand zwischen Probe und Schirm zwei bis drei Meter beträgt, sind beide Strahlen um ca. 10 bis 20 cm getrennt. Mit einer Polarisatorfolie lässt sich leicht nachweisen, dass beide Strahlen senkrecht zueinander polarisiert sind. Erwärmt man eine solche Probe z. B. mit einem Fön, rücken die beiden Strahlen aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Doppelbrechung näher zueinander. Am Phasenübergang von nematisch zu isotrop vereinigen sich die beiden Strahlen diskontinuierlich (Übergang 1. Ordnung) und weisen nur noch den einzelnen Strahl der isotropen Phase auf, entsprechend des Verlusts der Doppelbrechung.



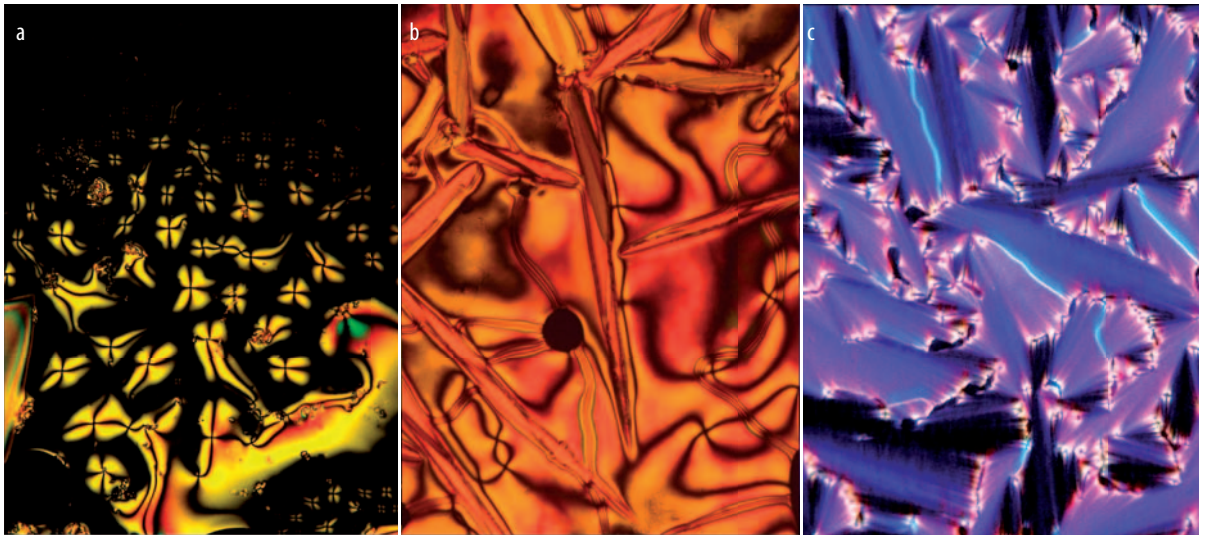


Abb. 5 Einige schöne Beispiele für Texturen verschiedener Flüssigkristallphasen: eine nematische Phase direkt am Übergang aus der isotropen Flüssig-

keit (a). Am Phasenübergang von nematisch zu smektisch A durchziehen smektische Bâtonnets (franz.: Stäbchen) eine typische Schlierenstruktur (b). Komple-

xer ist die Fächertextur einer fluiden ferroelektrischen SmC*-Phase (c). Ansätze dendritischen Wachstums sind in einer smektischen B-Phase zu sehen

1) www.karenneill.com

beeinflussen. Schon das einfache Reiben eines Glassubstrats mit einem Tuch kann eine planare Orientierung des Direktors verursachen. Schließlich spielt auch die Tatsache eine entscheidende Rolle, dass Flüssigkristalle sehr kleine elastische Konstanten im Bereich von 10^{-11} N aufweisen. Daher bilden Flüssigkristalle Defekte aus, die sich über bis zu hundert Mikrometer erstrecken können, während typische Defektgrößen in Festkörpern aufgrund der viel größeren elastischen Konstanten bei wenigen Nanometern liegen. Defekte in Flüssigkristallen lassen sich daher sehr einfach durch optische Polarisationsmikroskopie beobachten. Und genau dies macht den Reiz flüssigkristalliner Texturen aus (Abb. 5). Dank Doppelbrechung, kombiniert mit Defekten und Strukturbildung, entstehen Bilder von hoher ästhetischer und mitunter künstlerischer Ausstrahlung. Eine in Großbritannien bekannte Künstlerin, Karen Neill, benutzt z. B. Flüssigkristalle und deren Texturen als Grundlage für ihre künstlerischen Arbeiten.¹⁾

Jenseits von Displays

Vierzig Jahre nach den ersten Anzeigen, die auf Flüssigkristallen beruhen, könnte man leicht meinen, dass mit der Entwicklung der Displays für Computer und Flachbildfernseher die Erforschung der Flüssigkristalle abgeschlossen ist. Dies wäre aber ein fataler Trugschluss. Flüssigkristalle sind weit mehr als Materialien für Displays, und sie werden heute weltweit intensiver erforscht als je zuvor. Zwar wird mit den Bildschirmen das Geld verdient, und dort ist sicherlich auch ein Großteil der industriellen Gelder für Forschung und Entwicklung angesiedelt, aber gleichermaßen wird signifikante Grundlagenforschung und Materialentwicklung betrieben, die zu diversen Anwendungen in der Zukunft führen wird.

Ein Beispiel ist die Entwicklung neuer Materialien, bei denen man sich die Eigenschaften der Flüssigkristalle zunutze macht. So ist es gelungen, Kohlenstoff-Nanoröhrchen auszurichten, indem man

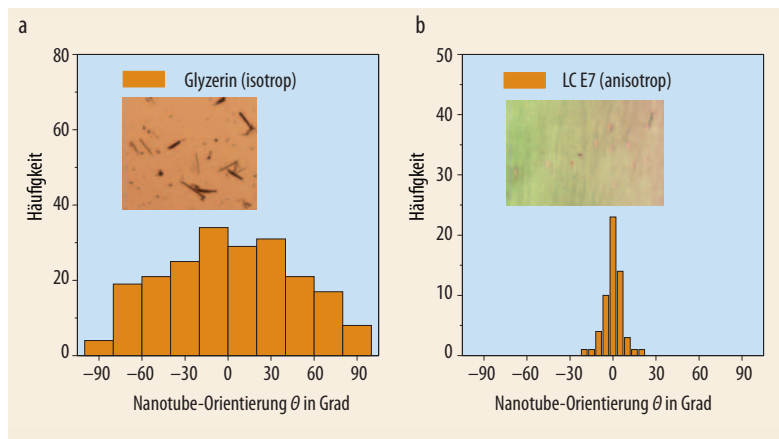


Abb. 6 Während die Orientierungen von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in Glyzerin nahezu isotrop verteilt sind (a), sind sie

in einem nematischen Flüssigkristall (LC E7) stark ausgerichtet (b). Die Insets zeigen mikroskopische Aufnahmen.

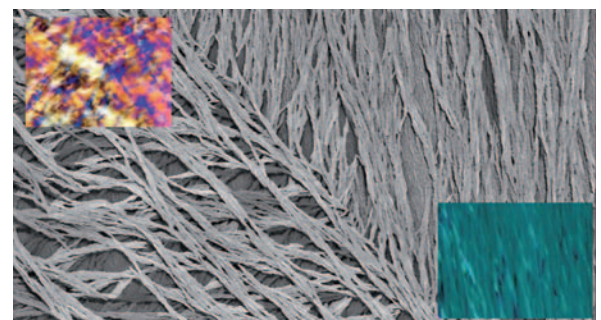
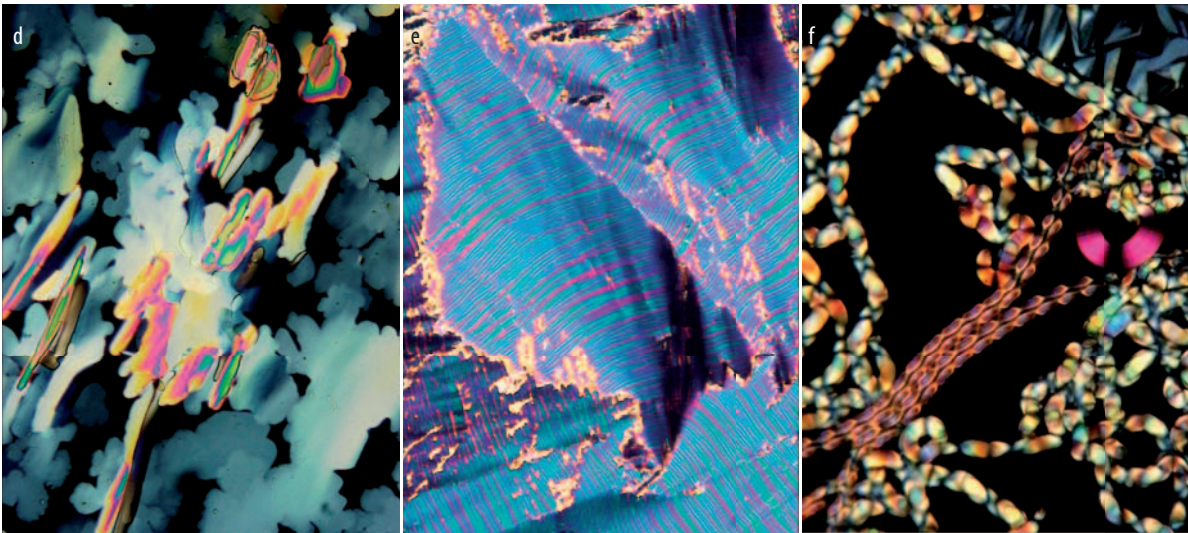


Abb. 7 Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Polymernetzwerks, das in einer besonderen „frustrierten“ Phase (twist-grain-boundary, links) und in einer SmA-Struktur (rechts) gebildet wurde. Links erkennt man eine generelle helikale Überstruktur, während rechts das Polymernetzwerk eine uniforme Struktur aufweist [9]. Die optischen Texturen (Insets) verifizieren die entsprechenden Strukturen.



(d). Weitere Beispiele sind eine hexatische Phase (e) sowie die immer noch ziemlich rätselhafte flüssigkristalline Phase, die B7-Phase (f). Diese wird

gebildet aus achiralen, bananenförmigen Molekülen, weist aber eine Vielzahl von chiralen Elementen auf, wie z. B. Helices oder doppelte Helices in

der Form von mehrfach überdrehten Telefonkabeln.

sie in Flüssigkristallen dispergiert [7]. Während die Nanotubes in Glycerin nahezu isotrop orientiert sind, überträgt sich die Orientierungsordnung von Flüssigkristallen durch elastische Wechselwirkungen auf die stark anisotropen Nanoröhrchen (Abb. 6). Durch die Möglichkeit der Umorientierung der Flüssigkristalle lassen sich so auch die Nanotubes zwischen verschiedenen Orientierungen schalten. Da sie entlang der Röhrchenachse elektrisch leiten und senkrecht dazu isolieren, sind molekulare Nanotube-Schalter möglich, die sich durch elektrische oder magnetische, vielleicht sogar optische Felder schalten lassen. Durch verschiedene Randbedingungen und Variation der Anisotropie (dielektrisch, magnetisch) sind sowohl An-Aus- als auch Aus-An-Schalter möglich. Auch als Feldsensoren eignen sich diese Zellen [7].

Ein weiteres modernes Forschungsgebiet sind polymer-stabilisierte Flüssigkristalle [8]. Hierbei werden einer flüssigkristallinen Phase stäbchenförmige, bi-funktionelle Monomere beigelegt, die durch UV-Strahlung polymerisiert werden. Das resultierende Polymernetzwerk nimmt während der Polymerisation die selbstorganisierte Struktur des Flüssigkristalls an (Abb. 7), die sozusagen als Vorlage für das sich bildende Polymernetzwerk dient [9]. Lenkt nun ein elektrisches Feld den Flüssigkristall aus seiner Orientierung aus, so führt die elastische Wechselwirkung zwischen Flüssigkristall und Polymernetzwerk nach dem Abschalten des Feldes zu einer schnellen Umorientierung zurück in den Ausgangszustand. Da Flüssigkristall und Netzwerk phasensepariert sind, ist es aber auch möglich, den Flüssigkristall durch ein geeignetes Lösungsmittel auszuwaschen. Dann kann man das Polymernetzwerk weiternutzen, vielleicht um photonische Strukturen herzustellen. Neben gleichförmig orientierten Netzwerken lassen sich auch helikale Strukturen bilden oder solche, die abrupt ihre Orientierungsrichtung ändern. Mögliche Anwendungen solcher „composites“

könnten bei reflektiven Displays ohne Polarisatoren liegen, bei elektronischem Papier, aber auch in wärme-reflektierenden Folien, z. B. als Alternative zur Klimaanlage.

Wie bereits erwähnt, können nematische Flüssigkristalle topologische Defekte aufweisen. Hier besteht ein Zusammenhang mit kosmologischen Theorien, die postulieren, dass sich das Universum während der Expansion, kurz nach dem Urknall, abkühlt und durch einen Phasenübergang von einem uniform homogenen Zustand in einen solchen mit unterschiedlicher Symmetrie übergeht. Zur gleichen Zeit können topologische Defekte entstehen, die dafür verantwortlich sind, dass das Universum nicht in seinem energetischen Grundzustand ist. Diese Defekte können Liniendefekte sein (cosmic strings), oder auch Punktdefekte. Wenn Defekte gleicher Stärke, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen aufeinandertreffen, können sich diese gegenseitig vernichten, um ein Universum niedrigster Energie zu realisieren.

Diese Defektvernichtung lässt sich mit Flüssigkristallen im Labor nachvollziehen und experimentell untersuchen, sozusagen als „Kosmologie im Labor“ [10]. Drastische Temperatur- oder Druckänderungen dienen dazu, Übergänge zwischen der isotropen und der

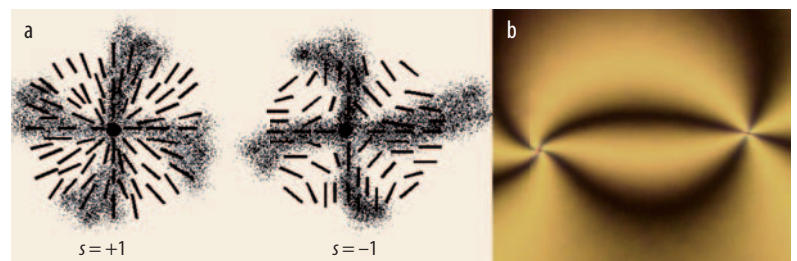


Abb. 8 Direktorfeld oder Topologie von Punktdefekten der Stärke $s = +1$ und $s = -1$ (a) und entsprechende Defekte in einem nematischen Flüssigkristall (b),

die sich anziehen und letztendlich gegenseitig vernichten, um ein uniformes und homogenes Direktorfeld $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ zu realisieren.

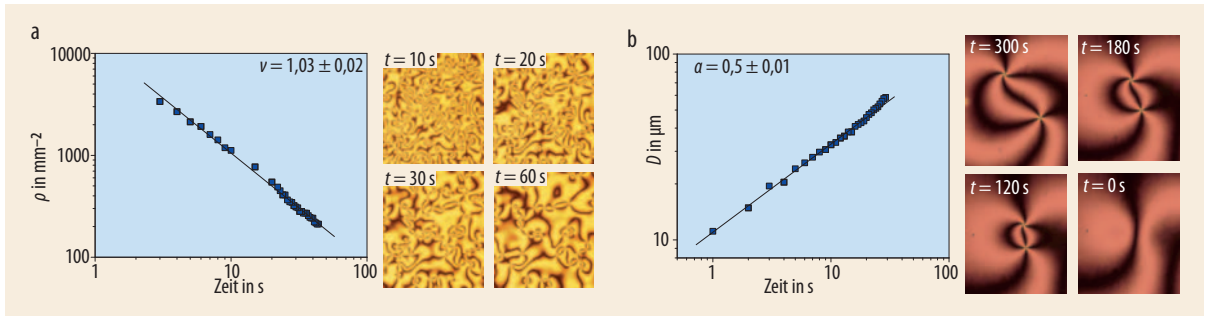


Abb. 9 In einem nematischen Flüssigkristall lässt sich die Dynamik der Defektverrichtung beobachten. Während die Defektdichte ρ sinkt (a), nimmt der Defekt-
abstand D zu (b). Die beobachteten Skalierungsexponenten ν und α sind un-
abhängig von den experimentellen Bedingungen, von der elektrischen Feldstärke, Frequenz, Zeldicke oder Temperatur.

2) Wenn man um die Singularität einen Kreis beschreitet, ergibt sich $|s|$ aus der Anzahl der gekreuzten schwarzen Schlieren geteilt durch 4. Je nachdem, ob sich die Schlieren bei Rotation der Probe im Uhrzeigersinn oder entgegengesetzt drehen, ist der Defekt positiv bzw. negativ.

nematischen Phase hervorzurufen und entsprechende Defekte zu induzieren. Dabei entstehen üblicherweise Liniendefekte, Loops und Punktddefekte verschiedener Stärke, die im Wesentlichen einem von der Theorie vorhergesagten Skalierungsverhalten folgen. Durch spezielle Oberflächenbehandlung, den Einsatz eines Flüssigkristalls mit negativer dielektrischer Anisotropie ($\Delta\epsilon < 0$) sowie die Anwendung elektrischer Felder ist es uns gelungen, ein Netzwerk von Defekten der Stärke $s = \pm 1$ zu induzieren.²⁾ Deren Topologie, oder in der Sprache der Flüssigkristalle, Direktorkonfiguration zeigt **Abb. 8a**, während **Abb. 8b** die entsprechend beobachtete Textur im Polarisationsmikroskop illustriert.

Defekte gleicher Stärke, aber unterschiedlichen Vorzeichens ziehen sich an und vernichten sich gegenseitig, wenn sie aufeinander treffen. Dabei nimmt die Defektdichte wie $\rho(t) \sim t^{-1}$ ab (**Abb. 9a**) und der Abstand zwischen zwei sich vernichtenden Defekten wie $D(t) \sim t^{1/2}$ zu (**Abb. 9b**), wobei t die Zeit bis zur Vernichtung ist. In ähnlicher Weise lassen sich mittels Polarisationsmikroskopie sehr einfach Prozesse und Dynamik der Domänenvergrößerung in Flüssigkristallen untersuchen, z. B. die Vergrößerung chiraler Domänen entgegengesetzter Händigkeit (**Abb. 10**) [11]. Theoretische Festkörperphysiker interessieren sich schon lange für Prozesse dieser Art [12].

Das alles und noch viel mehr

Flüssigkristalle sind sehr viel mehr als nur Materialien in flachen Bildschirmen. Die Physik der Flüssigkristalle ist ein weiterhin aufstrebendes und interdiszi-

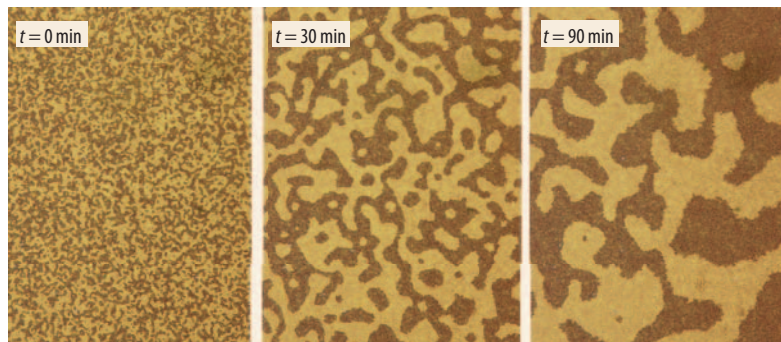


Abb. 10 Vergrößerung chiraler Domänen eines Flüssigkristalls.

plinäres Gebiet, welches physikalische Grundlagenforschung mit aktuellen Aspekten in der Chemie, Biologie, den Materialwissenschaften und der Elektrotechnik kombiniert. Flachbildschirme waren nur ein erster Schritt der Flüssigkristalle in die Hightech-Anwendungen. Weitere werden folgen.

Literatur

- [1] M. Hird und P. Collings, Introduction to Liquid Crystals, Taylor & Francis, London (1997)
- [2] S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, 2. Auflage., Cambridge University Press, Cambridge (1992)
- [3] P. G. deGennes und J. Prost, The Physics of Liquid Crystals, 2. Auflage, Clarendon Press, Oxford (1993)
- [4] K. Blankenbach, Physikalische Blätter, Mai 1999, S. 33
- [5] I. Dierking, Physikalische Blätter, Juni 2000, S. 53
- [6] I. Dierking, Textures of Liquid Crystals, Wiley-VCH, Weinheim (2003)
- [7] I. Dierking, G. Scalia, P. Morales und D. LeClere, Adv. Mater. **16**, 865 (2004); I. Dierking, G. Scalia und P. Morales, J. Appl. Phys. **97**, 044309 (2005); I. Dierking und S. E. San, Appl. Phys. Lett. **87**, 233507 (2005)
- [8] I. Dierking, Adv. Mater. **12**, 167 (2000)
- [9] P. Archer und I. Dierking, Soft Matter **5**, 835 (2009)
- [10] I. Chuang, R. Durrer, N. Turok und B. Yurke, Science **251**, 1336 (1991); I. Dierking, O. Marshall, J. Wright und N. Bulleid, Phys. Rev. E **71**, 061709 (2005)
- [11] A. Sicilia, J.J. Arenzon, I. Dierking, A.J. Bray, L.F. Cugliandolo, J. Martinez-Perdiguero, I. Alonso und I. C. Pintre, Phys. Rev. Lett. **101**, 197801 (2008)
- [12] A. J. Bray, Adv. Phys. **43**, 357 (1994)

DER AUTOR

Ingo Dierking (FV Dielektrische Festkörper) beschäftigt sich seit langem mit der Physik der Flüssigkristalle und anderer „weicher Materie“. Er studierte Physik in Clausthal-Zellerfeld und hat dort in der Physikalischen Chemie promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am IBM T. J. Watson Research Center, USA, verbrachte er zwei Jahre als Humboldt-Stipendiat an der Chalmers University in Schweden, wo er 1999 zum Dozenten für Physik ernannt wurde. Nach weiteren Jahren in der Physikalischen Chemie an der TU Darmstadt ist Dierking seit 2002 Hochschullehrer (Senior Lecturer, Associate Professor) an der School of Physics & Astronomy der University of Manchester in Großbritannien. Neben Forschung und Lehre führt Dierking seit vielen Jahren regelmäßig Kunstausstellungen mit wissenschaftlichem Hintergrund durch.

