

## Flüssigkristalle im Überblick

# Unentbehrlich in Natur, Technik und Forschung

LEOPOLD MATHELITSCH | ROBERT REPNIK | ZLATKO BRADAC | MOJCA VILFAN | SAMO KRALJ

*Flüssigkristalle gehören zu den Urbausteinen biologischer Systeme, ihre technische Anwendung ist fester Bestandteil unseres Alltags geworden. Flüssigkristalle können zudem helfen, andere physikalische Systeme zu verstehen.*

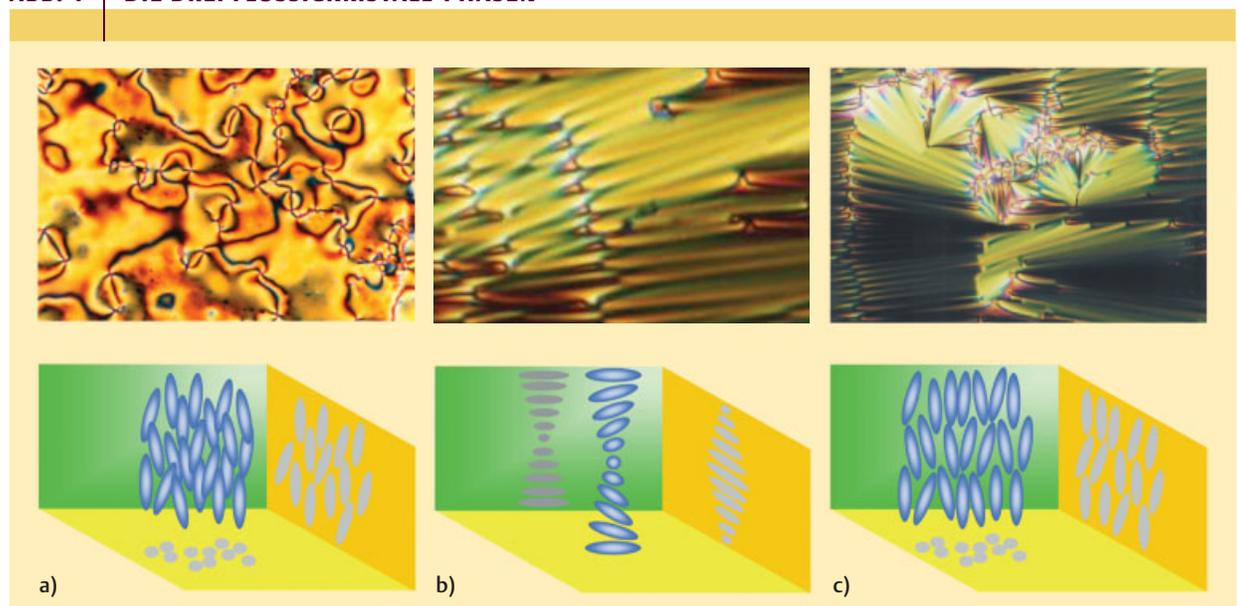
Flüssigkristalle werden häufig als vierter Aggregatzustand [1] bezeichnet, wenngleich es für diesen Titel durch das Plasma oder das kürzlich entdeckte Quark-Gluon-Plasma Konkurrenz gibt. Der Grund liegt darin, dass Flüssigkristalle eine interessante und eigenständige Form der Materie bilden: Sie fließen wie gewöhnliche Flüssigkeiten, zeigen aber ein Ordnungsverhalten, das sonst nur von Festkörpern bekannt ist.

Bei tieferen Temperaturen sind Flüssigkristalle fest (bei etwa 20 bis 60 °C), sie bilden eine kristalline Form. In ihr sind die Schwerpunkte der Moleküle regelmäßig angeordnet und auch ihre Achsen einheitlich ausgerichtet. Es gibt somit eine Ordnung bezüglich der Position und der Orientierung der Moleküle. Bei höherer Temperatur (häufig über

90 °C, bei manchen Stoffen aber auch weit darüber) bildet sich eine isotrope, flüssige Phase aus, die keine dieser Ordnungen aufweist. Bei Temperaturen zwischen diesen beiden Übergängen können aber Phasen entstehen, die von den beiden deutlich unterscheidbar sind. Obwohl das Material noch nicht fest ist, zeichnen sich Ordnungen ab, die weit über die Größenordnung der Moleküle hinaus reichen. Zumeist ist es eine Ordnung in der Orientierung der Moleküle, manchmal auch in ihren Positionen. Ein entscheidender Schritt in der technischen Nutzung gelang Anfang der 1970er Jahre mit neuen Materialien, deren flüssigkristalline Phase bei Zimmertemperatur liegt.

Die Moleküle, die Flüssigkristalle aufbauen, werden Mesogene genannt. Es sind organische Verbindungen, die sehr häufig eine längliche Stäbchenform haben. Der Mittelteil der Moleküle ist im Allgemeinen eine eher starre Verbindung von zwei oder mehreren Benzolringen, die Enden bestehen aus beweglichen Kohlenwasserstoffketten. Es sind aber auch andere Molekülformen bekannt, etwa scheibchenförmig oder bananenartig, die ähnliche Eigenschaften aufweisen. Man unterscheidet zwischen thermotropischen

ABB. 1 | DIE DREI FLÜSSIGKRISTALL-PHASEN



und lyotropischen Flüssigkristallen: Die erste Form wird durch Variation der Temperatur erzielt, die zweite durch Änderung der Konzentration von Substanzen. Die meisten bisherigen Forschungsergebnisse und Anwendungen beziehen sich auf thermotropische Flüssigkristalle mit stäbchenförmigen Molekülen.

### Phasen von Flüssigkristallen

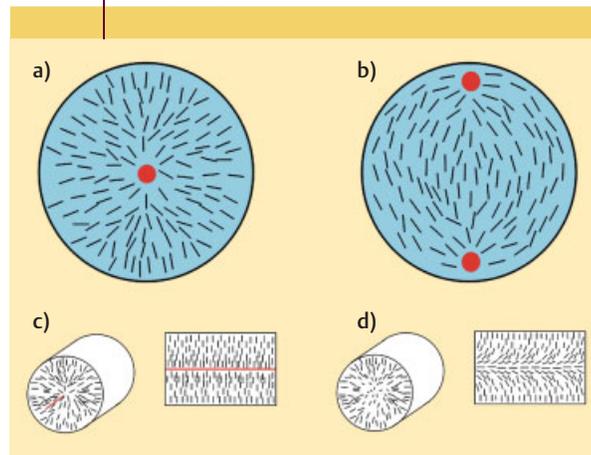
Flüssigkristalle können sich in verschiedenen Formen ausbilden, die in drei Gruppen, nematisch, smektisch und cholesterisch, eingeteilt werden.

Die *nematische Phase* (Abbildung 1a) stellt die einfachste Form von Flüssigkristallen dar. Die länglich geformten Moleküle sind in einem begrenzten Gebiet annähernd parallel ausgerichtet (Abbildung 1a unten). In großen Proben, bei denen der Einfluss der Randbedingungen vernachlässigt werden kann, sind die Moleküle im räumlichen und zeitlichen Mittel einheitlich in eine Richtung orientiert, der so genannten Symmetriebrechungsrichtung. Sie wird mathematisch durch das Direktorfeld ausgedrückt („Das nematische Direktorfeld“, S. 137). „Nematisch“ leitet sich vom griechischen Wort für Faden ab, und deutet auf die auffälligen Linienstörungen hin, die in Abbildung 1a oben deutlich sichtbar sind und später genauer diskutiert werden.

In der *cholesterischen Phase* (Abbildung 1b), wie es zum Beispiel das Cholesterol zeigt, sind die Moleküle gegeneinander verdreht (Abbildung 1b unten). Im Gleichgewicht verschrauben sie sich zu einer Helix. Die Windungslänge der Helix liegt mit etwa 300 nm in der Größenordnung der Wellenlänge von sichtbarem Licht und übertrifft so die Molekülgröße bei weitem. Die Ebenen, auf denen die Wendelachse normal steht, entsprechen den nematischen Anordnungen: So wird verständlich, dass die cholesterische und die nematische Phase thermodynamisch äquivalent sind. Diese Form heißt auch chirale nematische Phase, weil durch den (positiven oder negativen) Drehsinn der Helix eine bestimmte Händigkeit vorgegeben ist. Man kann in einer nematischen Phase eine cholesterische Struktur entwickeln. Dazu zwingt man durch geritzte Grenzplatten den anliegenden Molekülen bestimmte Richtungen auf, zwischen den Platten erfolgt dann ein Übergang durch konti-

◀ **a) Nematische Flüssigkristallphase, oben eine Aufnahme durch ein Polarisationsmikroskop. Die Fäden sind Linienstörungen. Unten: In der nematischen Phase sind die Moleküle bestrebt, sich an einer Symmetriebrechungsrichtung auszurichten. b) Cholesterische Flüssigkristallphase, oben Polarisationsmikroskop-Aufnahme. Unten: In der cholesterischen Phase zeigt sich eine Ausrichtung der Moleküle entlang einer Helix. c) Smektische Flüssigkristallphase, oben Polarisationsmikroskop-Aufnahme. Unten: In der smektischen Phase sind die Moleküle in Ebenen angeordnet. Man unterscheidet verschiedene Formen der smektischen Phase, die sich durch die Anordnung der Moleküle in den Ebenen unterscheiden. In der smektischen A-Phase sind die Moleküle normal zu den Ebenen orientiert.**

ABB. 2 | STRUKTURBILDUNG



**Strukturbildung am Beispiel der nematischen Phase: a) und b) zeigen zwei sphärische Oberflächenformen mit ein und zwei Punktstörungen, c) und d) zwei zylindrische Formen in Aufsicht und im Querschnitt. Anordnung c) kann nur in einem relativ dünnen Zylinder und bei hoher Temperatur stabilisiert werden.**

nuierliche Verdrehung der Ausrichtung. Diese Technik setzt man bei manchen Flüssigkristallanzeigen ein.

Die *smektische Phase* (vom griechischen Wort für Seife) ist durch eine Schichtstruktur charakterisiert (Abbildung 1c). Meist verhalten sich diese Materialien wie ein Festkörper in Normalrichtung zu den Schichtebenen und wie eine Flüssigkeit entlang dieser Ebenen. Es ergibt sich ein Stapel von zweidimensionalen flüssigen Schichten, wobei zwischen den Ebenen kaum eine Molekülverschiebung erfolgt. Man unterteilt mehrere Typen von smektischen Materialien, ihr Unterschied liegt in der molekularen Orientierung innerhalb der Schichten. Die Namensgebung A, B, C, ... richtete sich nach der chronologischen Abfolge ihrer Entdeckung, Abbildung 1c zeigt einen Stoff der smektischen Phase A.

### Eigenschaften von Flüssigkristallen

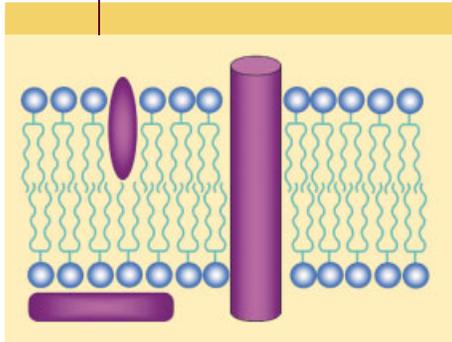
Flüssigkristalle sind eine Form weicher Materie. Einerseits kann die Struktur eines Flüssigkristalls sehr einfach durch Eigenschaften und Formen der Grenzflächen oder durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst werden. Da Flüssigkristalle praktisch immer von Rändern begrenzt sind, ist die Orientierung der Moleküle ein Kompromiss zwischen der natürlichen Anordnung und der Richtung, die die Oberflächen aufzwingen. Daraus entstehen verschiedene Strukturen, wie Abbildung 2 am Beispiel der nematischen Phase zeigt.

Andererseits kann eine schwache Störung eine relativ starke Wirkung verursachen. Eine kleine Energie, die lokal deponiert wird, kann - verglichen mit der molekularen Längendimension - einen Einfluss auf makroskopischer Skala haben. Aus diesem Grund kann man Flüssigkristalle auch als „gesprächig“ bezeichnen: Durch Beobachtung der Wirkung kann auf die (kleinen) Störungen rückgeschlossen werden. Die

#### INTERNET

Szenarien für Teilchen-Annihilation  
[www.fizika.uni-mb.si/complex/computer\\_presentation\\_halle/halle\\_presentation.html](http://www.fizika.uni-mb.si/complex/computer_presentation_halle/halle_presentation.html)

**ABB. 3 | ZELLMEMBRAN**



**Standardmodell der Membran einer biologischen Zelle, die aus einer Doppelschicht von phospholipiden Molekülen besteht. Rot: mögliche Einlagerungen von Proteinen.**

Messung der Wirkung wird dadurch erleichtert, dass diese in experimentell zugänglichen Längen- und Zeitbereichen erfolgt. Zusätzlich sind Flüssigkristalle durchsichtig, wobei sie elektro-optisch anisotrope Eigenschaften besitzen. Deshalb können sie mit sichtbarem Licht untersucht oder durch Licht beeinflusst werden.

Proben mit verschiedenen Strukturen lassen sich sehr einfach herstellen. Dazu müssen die begrenzenden Oberflächen speziell geformt oder entsprechende äußere Felder anlegt werden. Die Chemie von Flüssigkristallen ist hoch entwickelt, Chemiker können also ein gewünschtes Verhalten von Strukturen zum Teil „maßschneidern“. Eine interessante Entwicklung zeigt sich in der Vereinigung von Flüssigkristallen mit Polymeren [2], die zusätzlich die attraktive Möglichkeit der Stabilisierung von ferroelektrischen Flüssigkristallen beinhaltet [3].

Flüssigkristalle können also in unterschiedlichen Phasen und Strukturen auftreten und eine Reihe von physikalischen Phänomenen zeigen. Aus diesem Grund erfüllen sie auch verschiedenste Aufgaben in unserer natürlichen und technischen Umwelt.

### Flüssigkristalle in biologischen Systemen

Die Evolution hat mehrere Male Flüssigkristalle als beste Lösung für biologische Weiterentwicklungen gewählt [4] – Leben in unserer Form ist ohne Flüssigkristalle unmöglich. Dabei tritt ihre wichtige Rolle auf verschiedenen biologischen Ebenen zutage, die von Einzellern bis zu den höchsten Organismen reichen. Flüssigkristalle haben sich in der Evolution hauptsächlich wegen ihrer „Weichheit“ durchgesetzt, die chemische Reaktionen relativ leicht steuerbar macht. Ein biologisches System in flüssig-kristalliner Phase kann rasch Änderungen ausführen, wenn bestimmte Parameter diese auslösen. Dazu gehören Wechsel in Temperatur, Zug oder Druck, pH-Konzentration, Hydratation oder elektromagnetischen Feldern. Beispiele für Flüssigkristalle sind die DNS in den Chromosomen, zelluläre Membranen und die meisten Proteine.

Vielen biologischen Systemen stellt sich folgende Herausforderung: Sie sollen einerseits eine gewisse mechanische Stabilität aufweisen, andererseits sollen Austauschprozesse zwischen den verschiedenen Komponenten einfach erfolgen können. Stabilität kann durch eine feste Struktur geleistet werden, ein Transport erfolgt sehr leicht in flüssiger Phase.

Wir haben bereits gesehen, dass Flüssigkristalle beide Eigenschaften aufweisen. Darum ist es nicht verwunderlich, dass verschiedenste Ausformungen von Flüssigkristallen in der belebten und unbelebten Natur auftreten.

Als Beispiel ist in Abbildung 3 die wohl bedeutendste Anwendung zu sehen, nämlich die flüssigkristalline Struktur einer Zellmembran. Die wichtigste Komponente ist eine Doppellage von phospholipiden Molekülen. Deren hydrophobes (Wasser abstoßendes) Ende zeigt in das Membraninnere, das hydrophile (Wasser liebende) Ende (blaue Kugeln) hingegen nach außen. Diese phospholipiden Moleküle sind in einer flüssigkristallinen Phase, sie können sich also zum Beispiel in der Zellmembran bewegen. Das sorgt nicht nur für die Biegsamkeit der Membran, sondern die in sie eingelagerten Proteinen können so auch verschiedenste vitale Funktionen ausführen. Dazu zählt der Materialtransport in die Zelle und aus ihr heraus.

In einer höheren Ebene des biologischen Systems, besonders bei Säugetieren, gibt es „verschränkte Systeme“. Der Name soll andeuten, dass viele Komponenten eines Körpers miteinander in Verbindung stehen, wobei die verknüpfenden Einheiten etwa Haut, Sehnen, Knochen, Muskeln oder die Wände der Adern sind. Diese Elemente haben alle ihre spezielle Funktion, dienen aber auch der Kommunikation. Man vermutet, dass flüssigkristalline Komponenten dieser Elemente eine rasche Signalweitergabe ermöglichen [5].

Der wichtigste Stoff diesbezüglich ist das Kollagen, das häufigste Protein im Tierreich. Es gibt verschiedene kollagene Strukturen in den Geweben, wobei der Aufbau des Kollagens sehr stark von mechanischem Druck, pH-Wert, Ionenkonzentration oder elektromagnetischen Feldern abhängt. Die gerichtete Fernordnung der flüssigkristallinen Kollagenphasen könnte Kommunikationseigenschaften ermöglichen. Dabei würde die Signalausbreitung über elektrisch leitende Verbindungen laufen. Aufgrund des gebundenen Wassers können die Kollagenfasern den Strom entlang der Fasern leiten. Jede Änderung der Kollagenstruktur hat einen Einfluss auf den Prozentsatz gebundenen Wassers und dementsprechend auf die Übertragungskapazität.

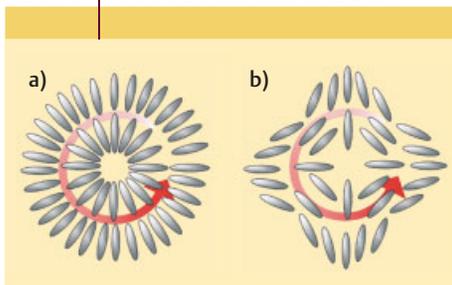
Diese elektrischen und flüssigkristallinen Eigenschaften des Kollagens könnten auch erklären, wie Akupunktur wirkt. Akupunktur-Punkte sind durch so genannte Akupunktur-Meridiane verbunden, die ähnliche Eigenschaften wie die bereits erwähnten elektrischen Leitungen haben und den Kollagenfasern entsprechen. Ein relativ kleiner Auslöser (Druck auf einen Akupunktur-Punkt) kann aufgrund der „Weichheit“ des flüssigkristallinen Kollagens eine weitreichende Veränderung bewirken, die etwa in einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit besteht.

### Flüssigkristalle und technische Anwendungen

Aufgrund ihrer einzigartigen Fähigkeiten werden Flüssigkristalle in unserer technischen Umwelt vielfach genutzt. Flüssigkristallphasen können von verschiedenen Lösungs-

**a) Störung mit Windungszahl  $M = +1$ , b) mit  $M = -1$ .**

**ABB. 4 | TOPOLOGISCHE LADUNG**



mittel gebildet werden, etwa von Seifen oder Waschmitteln. Wenn wir uns, Kleidung oder Geschirr waschen, bilden sich im Waschwasser flüssigkristalline Phasen. Die Wirkung von solchen Lösungsmitteln beruht wiederum auf der bei Membranen wichtigen Eigenschaft der Moleküle, hydrophile und hydrophobe Enden zu besitzen. So können sie verschiedene Strukturen an Grenzflächen zwischen Wasser und Öl bilden und damit die Wechselwirkungen zwischen diesen Materialien beeinflussen (Physik in unserer Zeit **2003**, 34 (1), 17).

Eine weitere wichtige Anwendung beruht auf den elektrooptischen Eigenschaften von Flüssigkristallen [1], wie sie etwa in Digitalanzeigen von elektronischen Geräten eingesetzt werden. [3] beschreibt zum Beispiel detailliert, wie solche Flüssigkristall-Displays funktionieren.

### Störstellen in Flüssigkristallen

Flüssigkristalle können auch dazu verwendet werden, andere physikalische Systeme zu simulieren und so Aufschlüsse über diese Systeme zu gewinnen. Wir wollen dies an zwei Beispielen zeigen, nämlich an Analogien von Flüssigkristallen in der Teilchenphysik und der Kosmologie. Eine wichtige Komponente bilden dabei Störstellen (Defekte) innerhalb einer sonst homogenen Substanz.

Störstellen sind definiert als Orte oder Gebiete in einer nematischen Phase, deren molekulare Ausrichtung nicht eindeutig bestimmt werden kann (Abbildung 4). In nematischen Flüssigkristallen gibt es Punkt- (Abbildungen 2a,b und 4) oder Liniendefekte (Abbildung 2c).

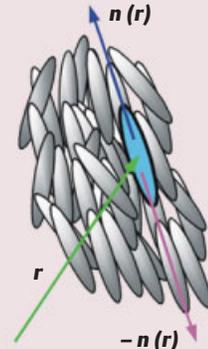
Man kann jedem Defekt eine geradzahlige topologische Ladung  $q$  zuordnen [6]. Sie ist durch das nematische Direktorfeld und dessen räumliche Ableitungen an einer geschlossenen Oberfläche um die Störung definiert. So genannte topologische Ladungen erlauben es, Störstellen zu klassifizieren und gruppentheoretische Argumente können mögliche Übergänge (Zerfälle, Verschmelzungen) erklären.

An einer Störung ist die Orientierung der Moleküle nicht eindeutig bestimmbar, aber die topologische Ladung gibt Aufschluss über ihr Verhalten. Die Gesetze der Erhaltung von topologischen Ladungen ähneln jenen der Erhaltung von elektrischen und anderen physikalischen Ladungen [7]. Das Vorzeichen dieser ganzzahligen Ladungen wird durch den „Frank-Index“ oder die Windungszahl  $M$  eingeführt. Die Windungszahl ist durch die Änderung der Richtung (beziehungsweise des Direktorfelds) gegeben, die sich bei einer Umrundung der Störstelle ergibt (Abbildung 4). Punktstörungen weisen ganzzahlige Werte von  $M$  ( $M = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ) auf, Liniendefekte können wegen der  $180^\circ$ -Symmetrie (siehe „Das nematische Direktorfeld“) auch halbzahlige Ladungen tragen ( $M = \pm 1/2, \pm 3/2, \dots$ ).

Die lokale Energiedichte ist in Störungen höher als in homogenen Substanzen (siehe rechts „Freie Energie und Störstellen“). Liniendefekte mit ganzzahliger Ladungszahl sind topologisch nicht stabil, weil sie sich kontinuierlich in einen störungsfreien Zustand umwandeln können (Abbildung 2d, „Flucht“ entlang der Liniendefekt).

### DAS NEMATISCHE DIREKTORFELD

Die lokale Orientierung der Moleküle wird durch ein Vektorfeld  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  beschrieben, das so genannte Direktorfeld. Befindet sich ein Molekül an der Stelle  $\mathbf{r}$ , so hat es im Durchschnitt die Orientierung  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  (Abbildung). In der nematischen Phase besitzen die Moleküle folgende Symmetrieeigenschaft: Eine  $180^\circ$ -Drehung um eine Achse normal zu  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ , also eine Transformation  $\mathbf{n}(\mathbf{r}) \rightarrow -\mathbf{n}(\mathbf{r})$ , hat keine Auswirkung auf physikalisch messbare Größen.

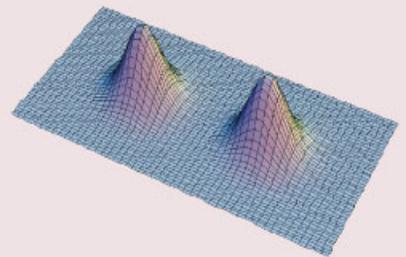


**Direktorfeld eines nematischen Flüssigkristalls.**

### FREIE ENERGIE UND STÖRSTELLEN

Störstellen besitzen eine höhere Energie als ihre Umgebung. Betrachtet man die Energiedichte, so zeigen sich Defekte als lokale Maxima über einem Durchschnittswert, der sich aus der freien Energiedichte eines homogenen großen Gebiets ergibt. Die Erzeugung von Störungen benötigt Energie, was man im Bild an der lokalen Erhöhung der freien Energie erkennen kann. Um eine Störstelle der Windungszahl  $M$  zu erzeugen, ist diese Energie in den meisten Fällen dem Quadrat von  $M^2$  proportional. Deshalb ist es energetisch vorteilhafter, mehr Störstellen mit niedriger Ladung zu erzeugen als weniger mit höherer Windungszahl – also zum Beispiel zwei Defekte mit

$M = 1/2$  anstelle von einer Störstelle mit  $M = 1$ . Diese beiden Möglichkeiten sind nach der Erhaltung der topologischen Ladungen gleich zulässig.

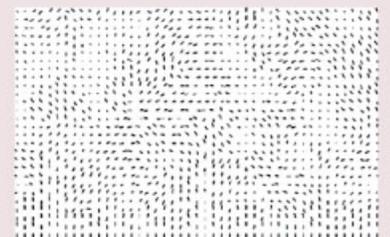


**Freie Energiedichte eines Paares von Störungen mit  $M = +1$  und  $M = -1$ .**

### I-N-ÜBERGANG

Die Abbildung zeigt eine Simulation des Übergangs von der isotropen zur nematischen Phase (I-N-Übergang). Sie basiert auf einem Modell der Brownschen Molekulardynamik mit so genannten Lebwohl-Lasher-Potentialen [12]. Dabei wird der Einfluss der Umrundung und der Geschwindigkeit des I-N-Übergangs auf das Wachsen der Bereiche untersucht. Nach dem I-N-Übergang werden Bereiche unterschiedlicher Orientierung sichtbar, wobei ein selbstähnlicher Zustand entsteht. Grundprinzipien für die beobachteten Phänomene sind Kausalität, eine gebrochene kontinuierliche Symmetrie und das Bestreben, die Gesamtoberfläche der Bereichswände

zu minimieren. Durch Studium dieses Modells kann man auf universelle Gesetze, die auch in anderen Systemen gelten, schließen.



**Typische Bereichsstruktur nach einem I-N-Übergang.**

Betrachtet man die innere Struktur einer Störung, so kann man qualitativ zwei Ausformungen oder eine Kombination beider erkennen [8]. Im Ursprung des Defekts kann die flüssigkristalline Phase entweder in eine isotrope Phase „schmelzen“ oder ein Molekül ändert seine im Flüssigkristall normale Form: Es geht in einen biaxialen Zustand über. Der Bereich, in dem die Phase sich von der allgemeinen Form sichtbar unterscheidet, wird als Kern der Störung bezeichnet. Die Größe des Kerns entspricht grob einer Korrelationslänge  $\xi$ , das ist die Ausdehnung einer lokal induzierten Störung. Sie ist typischerweise geringer als 10 nm.

### Nematische Flüssigkristalle und Teilchenphysik

Defekte der nematischen Phase ähneln elektrischen Ladungen der Stärke  $Q = M \cdot e$ , wobei  $e$  die Elementarladung darstellt: Störstellen unterschiedlicher Windungszahlen ziehen sich an, Defekte gleicher Ladung stoßen sich ab.

Haben Punkt- oder Linienstörungen einen Abstand voneinander, der größer ist als die Korrelationslänge  $\xi$ , so wechselwirken sie über das nematische Direktorfeld. Aufgrund der Anziehung kommen sich zwei gleich große Ladungen verschiedenen Vorzeichens von  $M$  immer näher, sie stoßen aufeinander und zerfallen in einen störungsfreien Zustand. Die freigesetzte Energie wandelt sich in Wärme um. Diese ist allerdings zu gering, um eine nennenswerte Temperaturerhöhung zu bewirken. Abbildung 5 zeigt die Simulation

des Vorgangs für zwei Störstellen mit den Windungszahlen  $M = \pm 1$  in einer schmalen Zelle während der verschiedenen Stufen des Annihilationsprozesses.

Das Phänomen ähnelt der Annihilation eines Teilchens mit einem Antiteilchen in den Vakuumzustand, wobei in diesem Fall jedoch die Energie als elektromagnetische Strahlung frei wird. Die Teilchenanalogie versagt allerdings, wenn der Abstand der Störstellen kleiner als die Korrelationslänge wird. Danach wechselwirken die Störstellen sehr stark und sind praktisch nicht mehr unterscheidbar.

Diese Analogie kann von der allgemeinen Teilchen-Antiteilchen-Annihilation auf die Quark-Antiquark-Vernichtung spezialisiert werden. Die Wechselwirkung zwischen den Störstellen hängt zum Teil von den Nebenbedingungen ab, etwa von der Größe und der Art der Begrenztheit der Zelle. Diese Bedingungen können nun derart gestaltet werden, dass die Wechselwirkungsenergie auf einen relativ schmalen Bereich in der Größenordnung der Korrelationslänge beschränkt ist. Man erhält damit eine aus der Quarkphysik bekannte String ähnliche Struktur der Wechselwirkung [9], wobei die resultierende Kraft unabhängig vom Abstand zwischen den Ladungen ist. Diese Form der Kraft zwischen Quarks und Antiquarks bewirkt unter anderem, dass Quarks nicht als freie Teilchen in Erscheinung treten können: Sie sind immer in beobachtbaren Teilchen, den Hadronen, eingeschlossen.

### Nematische Flüssigkristalle und Kosmologie

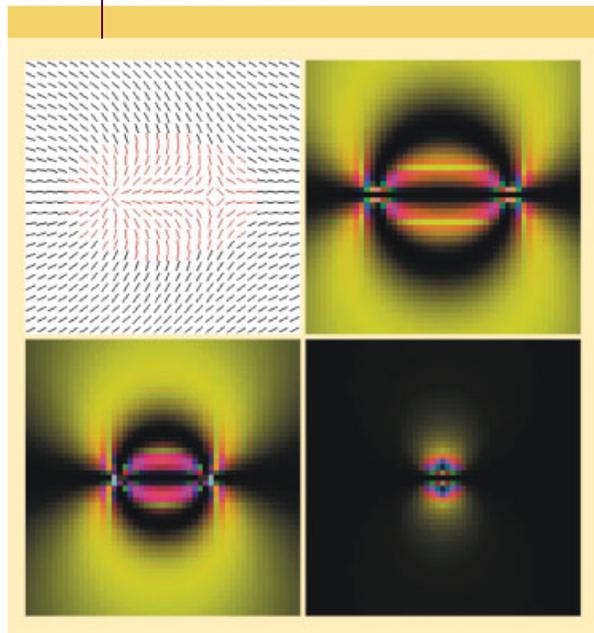
Es gibt eine starke Analogie zwischen der Evolution des Raums nach dem Urknall und einer plötzlichen Abkühlung eines Flüssigkristalls. Bei ihr erfolgt ein Übergang von der isotropen zur nematischen Phase („I-N-Übergang“, S. 137 und [10,11]).

In Flüssigkristallen entspricht dieser Übergang der Ausbildung einer Vorzugsrichtung. Bei sehr rascher Abkühlung sind wegen der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Information verschiedene Gebiete kausal getrennt. Deshalb bilden sich Bereiche aus, innerhalb derer sich die Flüssigkristalle unabhängig von anderen Gebieten ausrichten. Die Ausrichtungen der einzelnen Gebiete entspricht folglich einer Zufallsverteilung. Mit der Zeit wachsen die größeren Gebiete auf Kosten der kleineren, weil dieser Zustand energetisch günstiger ist. Dementsprechend wächst der mittlere Abstand zweier Bereiche.

An den Grenzen der Gebiete entwickeln sich Störstellen, wobei ganz- und halbzahlige Defekte entstehen. Monopole und Antimonopole, also Punktstörungen mit Windungszahlen  $M = +1$  und  $-1$ , haben eine größere Mobilität und annihilieren deshalb nach einer relativ kurzen Zeit. Es bleiben Linienstörungen mit der Windungszahl  $\pm 1/2$  übrig. Nach einer Startphase wird also die Kristallstruktur dominiert von Liniendefekten, die erst in einem längeren Zeitraum allmählich verschwinden.

Es wird vermutet, dass ein ähnlicher Prozess in der Frühphase des Universums abgelaufen ist. Die Symmetriebrechung erfolgt durch ein Higgs-Feld [11]. Allerdings gibt es

ABB. 5 | PAAR-ANNIHILATION



**Verschiedene Stadien des Annihilationsprozesses eines Paares von Störungen mit Windungszahlen  $M = +1$  und  $M = -1$ . a) Ein typisches Direktorfeld für Störungen mit einem größeren Abstand als die Korrelationslänge  $\xi$ . b) – d) Numerische Simulation einiger Stadien des Annihilationsprozesses, wie sie durch ein Polarisationsmikroskop zu sehen wären. Ein störungsfreier Zustand erscheint schwarz.**

derzeit noch keine experimentelle Bestätigung eines solchen Feldes. Der Higgs-Mechanismus ist unter anderem deshalb sehr attraktiv, weil er die Größen der Teilchenmassen und ihrer Massendifferenzen erklären kann. Qualitativ ähnelt die Situation der eben beschriebenen Ausbildung getrennter Gebieten in schnell abkühlenden Flüssigkristallen. Im frühen Kosmos unterschieden sich solche Gebiete durch verschiedene Werte des Higgs-Feldes, wobei an den Bereichsgrenzen ebenfalls Störungen auftraten. Diese Linienstörungen, die schon erwähnten kosmischen Strings, bilden eine wichtige Komponente der kosmologischen Evolution. Dabei hängt insbesondere die anfängliche Dichteverteilung der Strings ursächlich mit der großräumigen Struktur des heutigen Kosmos zusammen.

Es ist allerdings sehr schwierig, auf die ursprüngliche Stringdichte rückzuschließen. Das einzige „Fenster“ zur Vergangenheit ist die elektromagnetische Strahlung. Da aber der Kosmos für diese Strahlung erst etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall transparent wurde, können über die Situation vor diesem Zeitpunkt nur schwer Aussagen getroffen werden. Ein möglicher Ansatz besteht darin, diesen Zeitabschnitt in analogen Systemen zu untersuchen. Die starke Universalität der Bereichsbildungen nach einer raschen Symmetriebrechung erlaubt es, Hypothesen von kosmologischen Modellen an nematischen Flüssigkristallen zu testen.

**Zusammenfassung**

Flüssigkristalle können wie eine Flüssigkeit fließen und zugleich eine innere Ordnung besitzen, die an Festkörper erinnert. Sie begegnen uns im Alltag in vielen technischen Anwendungen, beispielsweise in Displays von elektronischen Geräten. Seit Millionen von Jahren sind sie schon zentrale Bausteine von biologischen Systemen. Dazu zählen zum Beispiel die DNS, viele Proteine und die Membran, die lebende Zellen umschließt. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften eignen sich Flüssigkristalle gut als Analogien für andere physikalische Systeme: zum Beispiel die Teilchen-Antiteilchen-Annihilation oder kosmologische Modelle des Universums kurz nach dem Urknall.

**Stichworte**

Flüssigkristall, weiche Materie, nematische Phase, cholesterische Phase, smektische Phase, DNS, zelluläre Membran, Protein, Display, Paarvernichtung, Teilchen-Antiteilchen-Annihilation, Quark-Antiquark-Annihilation, Strings, Higgs-Feld, kosmologische Modelle.

**Danksagung**

Diese Arbeit wurde von der Wissenschaftlich-Technischen Zusammenarbeit Österreich-Slowenien, Projekt SLO-A11, SLO-A2/2002 und vom ESF Projekt COSLAB unterstützt.

**Literatur**

[1] P.J. Collings, Liquid Crystals. Nature’s Delicate Phase of Matter, Princeton University Press, Princeton, Oxford 2002.

[2] Ch. Tolksdorf et al., Physik in unserer Zeit **2002**, 32 (3), 130.  
 [3] I. Dierking, Physikalische Blätter **2000**, 56, 53.  
 [4] J. Seddon and R. Templer, New Scientist **1991**, 45, 1769.  
 [5] Mae-Wan Ho, The Rainbow and the Worm: The Physics of Organism, World Scientific, London 1998.  
 [6] W. F. Brinkman and P.E. Cladis, Physics Today **1982**, May, 48.  
 [7] O. D. Lavrentovich, Liquid Crystals **1998**, 24, 117.  
 [8] S. Kralj et al., Phys. Rev. E **1999**, 60, 1858; J. Phys. A: Math. Gen. **2001**, 34, 829.  
 [9] H. Fritzsche, Quarks. Urstoff unserer Welt. Piper Verlag, München 2001.  
 [10] H. Trebin, Liquid Crystals **1998**, 24, 127.  
 [11] D. N. Spergel and N.G. Turok, Spektrum der Wissenschaft **1992**, Mai, 72.  
 [12] Z. Bradac et al., Phys. Rev. E **1998**, 58, 7447; Phys. Rev. E **2001**, 65, 021705.

**Die Autoren**



Leopold Mathelitsch, geb. 1950, Studium der Mathematik und Physik an der Universität Graz, an der er derzeit als ao. Univ. Prof. am Institut für Theoretische Physik arbeitet. Fachgebiete: Teilchenphysik, Didaktik der Physik.



Mojca Vilfan, geb. 1974, Studium der Physik an der Universität Ljubljana, Promotion 2001. Mitarbeiterin am J. Stefan Institut in Ljubljana, Arbeitsgruppe „Licht und Materie“, mit dem Forschungsschwerpunkt Stabilisation von Flüssigkristallen.



Robert Repnik, Assistenzprofessor an der Universität Maribor (Slowenien) und Mitglied der Arbeitsgruppe „Physik komplexer Systeme“. Forschungsgebiet: Universelle Phänomene von Flüssigkristallen.



Samo Kralj, Professor an der Universität Maribor (Slowenien) und Leiter der Arbeitsgruppe „Physik komplexer Systeme“. Forschungsgebiet: Universelle Phänomene von Flüssigkristallen.



Zlatko Bradac, Professor an der Universität Maribor (Slowenien) und Mitglied der Arbeitsgruppe „Physik komplexer Systeme“. Forschungsgebiet: Universelle Phänomene von Flüssigkristallen.

**Anschrift:** Univ.-Prof. Dr. Leopold Mathelitsch, Institut für Theoretische Physik, Universität Graz, Universitätsplatz 5, A-8010 Graz. leopold.mathelitsch@uni-graz.at