

Philosophisch zu flüssigen Kristallen

Nicht-klassische Aggregatzustände am Experiment erleben

A. Kruse, J. Twardon, C. Denz

Der Beitrag präsentiert ein experimentbasiertes Unterrichtskonzept zu Flüssigkristallen, in dem eine naturphilosophische Perspektive das Hinterfragen wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Allgemeinen und das Entdecken optischer Technologien im Speziellen ermöglicht.

Stichwörter: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung, Flüssigkristalle, Aggregatzustände

1 Einleitung

Was bedeutet es, wissenschaftlich chemische Abläufe zu beobachten? Welche Rolle spielt dabei der naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinn? Und wie kann ein Blick über den Tellerrand der Chemie zu Innovationen auch in anderen naturwissenschaftlichen Gebieten führen? Der flüssigkristalline Aggregatzustand eignet sich geradezu idealtypisch, um an diesen Fragen anknüpfend Jugendlichen einerseits einen anschaulichen Zugang zur Rolle von Experimenten bei revolutionären und das

Weltbild verändernden Entdeckungen zu eröffnen und andererseits das technologische Potential einer nicht-klassischen Phase zu demonstrieren.

Obwohl eine Anwendung der flüssigkristallinen Phase im Alltag der Schülerinnen und Schüler omnipräsent ist – wie beispielsweise in Displays von Handys, Notebooks oder Monitoren – ist die Thematisierung dieses nicht-klassischen Aggregatzustands nicht explizit im Lehrplan vorgesehen. In der bestehenden Literatur werden zwar vereinzelt Konzepte und Experimentierbeispiele zur Behandlung der fachlichen Grundlagen im Unterricht angeboten [1, 2, 3], allerdings stehen hier vor allem theoretische oder technologische

Bezüge im Vordergrund. Die flüssigkristalline Phase hat darüber hinaus das Potential, als technologisch relevantes, im Alltag präsent Phänomen einen Zugang zu den Grundlagen der historischen Wissenschaftsentwicklung und ihrer wissenschaftstheoretischen Bedeutung im Allgemeinen zu erarbeiten. Dies ist bisher kaum in didaktischen Konzepten umgesetzt, aber insbesondere daher relevant, da unter Jugendlichen die Meinung verbreitet ist, dass naturwissenschaftliches Wissen durch objektive Experimente vorurteils- und zweifelsfrei gewonnen werden kann [4], und demnach auch Technologien einfach die Anwendung von „wahren“ Zusammenhängen der Natur

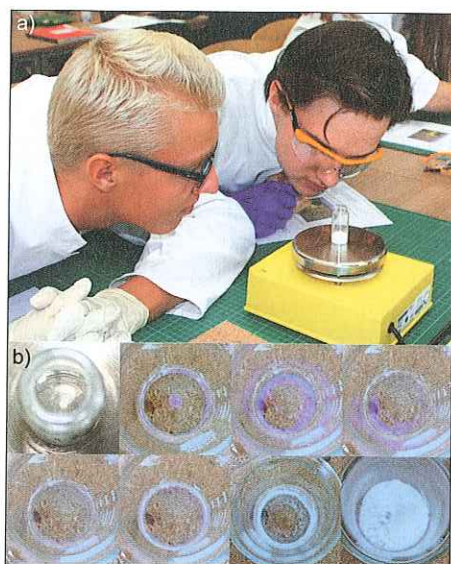


Abb 1: Versuch zum Phasenübergang von Cholesterylbenzoat (a). Phasenübergänge vom flüssigen (links oben) zum kristallinen (rechts unten) Zustand (b).

darstellen. Sehr selten reflektieren die Schülerinnen und Schüler, dass wissenschaftliche Beobachtungen eingebunden in vorherrschende Weltbilder entstehen und – wie am Beispiel der Entdeckung der flüssigkristallinen Phase gezeigt wird – revolutionäre wissenschaftliche Entwicklungen auslösen können [5].

Anknüpfend an diesen Ansatz haben wir ein Unterrichtskonzept zur flüssigkristallinen Phase für die Oberstufe entwickelt, das synergetisch theoretische Modellbildung, experimentelles Erleben und Verstehen von technologischen Anwendungen verbindet, um neben der fachlichen Dimension auch ein allgemeines Verständnis für die Methoden und Denkweisen der Naturwissenschaft zu entwickeln. Es beinhaltet zwei Säulen: die Entdeckungsgeschichte der flüssigkristallinen Phase von den Grundlagen bis hin zu ihrer Anwendung in optischen Technologien am Experiment sowie das wissenschaftstheoretische Hinterfragen des dabei ablaufenden Erklärungsprozesses.

Dazu untersuchen die Teilnehmenden in unserem Unterrichtskonzept zunächst in einfachen, jedoch didaktisch explizit auf die Fragestellung des Erkenntnisgewinns ausgerichteten Experimenten flüssigkristalline Materialien hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften. Ihre Beobachtungen diskutieren und deuten sie dabei zunächst im Rahmen bisher bekannter Modelle, um dann durch eine genaue Reflektion der geschichtlichen Interpretation den aktuellen Forschungsstand zu erschließen. In diesem Zusammenhang wird auch der Pro-

zess der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung per se diskutiert. Abschließend werden die erarbeiteten Grundlagen auf ihre Anwendungsrelevanz geprüft und auf die Herstellung von Flüssigkristalldisplays erweitert. Hier wird die dazugehörige Technologie anhand von uns entwickelter Modelle veranschaulicht. Mit Hilfe des überraschenden Zeno-Effekts sowie eines Reis-Modells werden grundlegende theoretische Konzepte des neuen Aggregatzustandes verdeutlicht und die Funktionsweise einer Flüssigkristallzelle als optische Technologie experimentell zugänglich gemacht.

2 Entdecken eines neuen Aggregatzustands

Aufbauend auf ihrem Wissen über klassische Aggregatzustände erforschen die Teilnehmenden zu Beginn der Unterrichtseinheit an einem einfachen Versuch Phasenübergänge am Beispiel von Cholesterylbenzoat (Probengläschen mit Deckel, Heizplatte, siehe Abbildung 1 oben). Wichtig für das eigene Entdecken ist, dass der Begriff der flüssigkristallinen Phase zunächst nicht durch die Lehrkraft genannt und somit das Ergebnis dieser Unterrichtseinheit vorweggenommen wird.

Cholesterylbenzoat eignet sich für diesen didaktischen Ansatz besonders gut. Es weist eine flüssigkristalline Phase auf, welche bereits 1888 von dem Botaniker Friedrich Reinitzer entdeckt [6] und später durch Otto Lehmann näher erforscht wurde [7]. Cholesterylbenzoat liegt bei Raumtemperatur als Feststoff (weißes Pulver) vor und geht ab einer Temperatur von etwa 145 °C in die flüssigkristalline Phase über (trüb und zähflüssig, blauer Schimmer, sogenannte blaue Phase), bevor ab circa 178 °C der Klärpunkt erreicht wird und der Stoff klar und flüssig ist (vgl. Abbildung 1 unten). Der Vorgang ist reversibel und kann von den Teilnehmenden wiederholt durchgeführt werden.

Aufgabe der Schülerinnen und Schüler ist es nun, die Beobachtungen in ihr bisheriges Modell der Aggregatzustände einzuordnen. Leicht identifizieren sie die flüssige sowie die feste Phase. Die Trübung des Stoffes in der flüssigkristallinen Phase wird häufig darauf zurückgeführt, dass es sich nicht um einen Reinstoff, sondern um ein Gemisch handelt, welches sich nur in einem bestimmten Temperaturbereich auftrennt und dann auch besondere Farberscheinungen zeigt.

Die Vermutungen der Schülerinnen und Schüler schließen sich direkt an die historische Entdeckungsgeschichte der

Flüssigkristalle an. Um dies bewusst zu reflektieren, thematisieren wir mit den Jugendlichen die historischen Überlegungen mit Hilfe eines szenischen Dialogs (oder durch Auszüge aus den Originaltexten, vgl. dazu auch [8]). Die Schülerinnen und Schüler stellen hier Forschende dar, die mit der Lehmann verkörpernden Lehrkraft über ihre Beobachtungen diskutieren (Originalzitate siehe Kasten 1).

Bei dieser Diskussion stellt sich schnell heraus, dass die um die Jahrhundertwende herrschende Identitätstheorie wie das auch häufig von den Schülerinnen und Schülern vertretene Kugelteilchenmodell lediglich die klassischen Phasen erklärt und eine stetige Änderung zwischen fest und flüssig oder gar einen dort befindlichen neuen Aggregatzustand nicht zulässt. Reinitzer vermutete damals aufgrund der Beobachtungen, dass sich die Substanz entmischt und daher besondere Eigenschaften zeigt, Lehmann hingegen ging von der Existenz eines neuen Aggregatzustands aus – eine Theorie, die sich erst im Laufe des nächsten Jahrhunderts durchsetzte und das klassische Modell der Aggregatzustände erweiterte. Um die Bezüge dieser Entdeckungsgeschichte zu grundlegenden Prinzipien der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung herzustellen und kritisch zu hinterfragen, betrachten wir diese nachfolgend gemeinsam mit den Schülerinnen und Schülern in einem Perspektivwechsel aus einer wissenschaftstheoretischen Sichtweise heraus.

3 Grundzüge wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung

Anhand der historischen Entwicklung der Hypothesenbildung bei der Entdeckung der flüssigkristallinen Phase bietet es sich an, mit den Schülerinnen und Schülern darüber zu diskutieren, dass sich dem Forschenden neue wissenschaftliche Erkenntnisse nicht einfach offenbaren, sondern dass vor allem Beobachtungen immer im Licht der vorherrschenden Theorien erfolgen. Bestehende wissenschaftliche Überzeugungen können Beobachtungen nachhaltig beeinflussen – Dies zeigt das Beispiel der trüben Phase, die im damaligen Bild der Aggregatzustände als ein Gemisch identifiziert wurde, und erst detaillierte Untersuchungen ihren neuartigen Charakter offenbarten. Beobachtungen können also einerseits bestehende Erklärungsmodelle verfestigen, sind aber an anderer Stelle auch Motor für wissenschaftliche Weiterentwicklungen. Dies widerspricht dabei nicht dem Grund-

- Lehmann: „Der Erstarrungs- oder Kristallisationsprozess ist [nach der Identitätstheorie] nichts anderes als ein Einschnappen der in der Schmelze regellos gelagerten Moleküle zu einem Raumgitter.“
- Reinitzer: „Es fiel mir jedoch auf, dass [Cholesterylbenzoat] nicht zu einer klaren, durchsichtigen, sondern stets zu einer trüben, nur durchscheinenden Flüssigkeit schmolz [...]. Bei näherer Untersuchung zeigt sich denn auch, dass beim Erwärmen auf höhere Temperatur plötzlich die Trübung verschwindet. [...] Beim Abkühlen der klargeschmolzenen Verbindung tritt an einer Stelle eine tiefviolettblaue Farbe auf, die sich rasch über die ganze Masse ausbreitet und fast ebenso rasch wieder verschwindet, in dem an ihre Stelle eine gleichmäßige Trübung tritt.“
- Reinitzer: „Das Zustandekommen der Farberscheinung konnte jedoch bis jetzt nicht in zufriedenstellender Weise erklärt werden. Nur soviel steht fest, dass dieselbe mit der Ausscheidung und dem Wiederauflösen einer bis jetzt noch völlig rätselhaften Substanz in innigem Zusammenhang steht.“
- Reinitzer: „Eine Verunreinigung kann nicht vorliegen, da die Erscheinung bei verschiedenen Cholesterinabkömmlingen vorkommt [...]“
- Lehmann: „[Cholesterylbenzoat] lieferte eine trübe Schmelze, schien somit aus zwei beim Schmelzen sich entmischenden Substanzen zu bestehen, deren eine eine klare isotrope Schmelze bildete, während die andere anscheinend in Form sehr kleiner schwer erkennbarere, in dieser Schmelze schwimmender fester Kriställchen auftrat. [...] Es dauerte 1 ½ Jahre, bis ich wagte, mit der Vermutung öffentlich hervorzutreten, diese Flüssigkeit sei keineswegs identisch mit der isotropen Schmelze, sondern ein regelloses Aggregat derselben Moleküle, aus welchen die Kriställchen bestehen. [...] Dass dieses regellose Molekularaggregat verschieden ist von der isotropen Schmelze, schloss ich daraus, dass es schwerer beweglich, zäher ist als diese und keine Kristalle ausscheidet.“
- Lehmann: „Hiermit war eine völlig neue Art der Zusammenlagerung [...] aufgefunden. [...] Die neue Aggregationsart stellt eine Zwischenform dar, ich nannte sie deshalb die halbisotrope Struktur.“
- Lehmann: „Da [die Identitätstheorie] noch allgemein angenommen war und in jedem Lehrbuch als Grundlage benutzt wurde, war meine Behauptung für die meisten Leser vollkommen unverständlich. Sie hatte nach der Identitätstheorie keinen Sinn, denn nach dieser war eben ein regelloses Aggregat derselben Moleküle [...] nichts anderes als die isotrope Schmelze. [...] [Eine] stetige Änderung des Raumgitters, wie sie das Fließen voraussetzt, ist also unmöglich.“

Kasten 1: Originalzitate des Diskurses von Reinitzer [6] und Lehmann [7]

gedanken der Objektivität, denn die semantische „Theoriebeladenheit“ der Beobachtung stellt einen charakteristischen Zug von Wissenschaft da (vgl. zum Beispiel [9]). Der wissenschaftliche Beobachtungsbegriff ist aus dem Wesen der Wissenschaft heraus von unseren Theorien geprägt, denn erst durch diese werden experimentelle Daten strukturiert und verallgemeinert interpretierbar. Dies führt dazu, dass das Beobachtete, in diesem Beispiel die flüssigkristalline Phase, auch im Rahmen der Beobachtungsgrößen der bestehenden Theorie, also hier als etwas Flüssiges mit einer Trübung, gesehen wird. Der Prozess der Wissenschaft sowie die Beobachtungen an sich sind somit immer theoriebeladen.

Um der Vorstellung des Forschungsprozesses in den Naturwissenschaften als ein kumulatives Ansammeln von Fakten und damit einem einfachen Aufdecken von Wahrheiten entgegenzuwirken, wird im Rahmen dieser Unterrichtseinheit die Entdeckungsgeschichte der flüssigkristallinen Phase auch in Bezug auf prinzipielle Kennzeichen des Verlaufs des wissen-

schaftlichen Fortschritts diskutiert. Denn der Wandel einer Theorie zu einer nächsten läuft nach der prominenten Ansicht des Philosophen Thomas Kuhn genau nicht kumulativ ab, sondern weist revolutionäre Züge auf [10]: Forschende arbeiten nach Kuhn immer unter der Herrschaft eines bestehenden Paradigmas, welches das derzeitige wissenschaftliche Weltbild sowie den zugehörigen Theorienapparat umfasst und die empirischen Daten bestmöglich beschreibt. Beobachtungen werden in dieses Erklärungsmodell eingeordnet, einzelne „Anomalien“ vernachlässigt, und die vorherrschende Theorie durch empirische Daten fundiert. Erst wenn vermehrt unerklärbare Beobachtungen auftreten und ein neues Paradigma die empirischen Daten besser erklärt als das alte, kann ein Theorienwandel eingeleitet werden. Hierbei resultiert aus neuen Begriffen auch eine neue Sichtweise auf die Welt, sodass wiederum neue Beobachtungen möglich sind. Allerdings erstreckt sich dieser Wandel gegebenenfalls über große Zeiträume, denn die Anhänger des alten Paradigmas orientieren

sich möglichst lange an den bestehenden und scheinbar etablierten Theorien, während sich eher junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit den revolutionären Ideen beschäftigen, diese weiter entwickeln und sich schließlich mit ihnen durchsetzen. Nach Kuhn sind wissenschaftliche Revolutionen in ihrem Prozess daher häufig fast unsichtbar und werden meist erst durch wissenschaftstheoretische Reflektionen aufgedeckt.

Am Beispiel der Entdeckung der flüssigkristallinen Phase sind Kennzeichen dieses Prozesses und das Festhalten an einem alten Paradigma sehr gut zu beobachten [5]. Lange nach der Veröffentlichung von Lehmann wurde noch über die Natur der flüssigkristallinen Phase diskutiert, die Idee eines neuen Zustand abgelehnt und versucht die scheinbaren Anomalien mit dem bisherigen Modell zu vereinbaren: Zum einen war die Meinung verbreitet, dass es sich um ein zweiphasiges Gemisch der Art einer Emulsion handelt [11], zum anderen wurde trotz einer Garantie durch die damaligen Hersteller die Reinheit der verwendeten Substanzen in Frage gestellt [5]. Auch eine Kommission, die kurz nach der Jahrhundertwende zur Klärung der offenen Frage eingesetzt wurde, kam zu keinem Ergebnis. Wissenschaftler wie Gustav Tammann stritten weiterhin die Existenz flüssiger Kristalle ab. Erst im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden durch die Untersuchungen von Naturwissenschaftlern wie Georges Friedel, Daniel Vorländer und Pierre-Gilles de Gennes die Ideen von Lehmann theoretisch vervollständigt und damit so weiterentwickelt, dass sie die wissenschaftliche Gemeinschaft schließlich überzeugten und die Beschreibung der Aggregatzustände revolutioniert wurde [5]. Die revolutionäre Bedeutung dieser Entwicklung zeigt sich beispielsweise darin, dass de Gennes unter anderem für seine Arbeit auf dem Gebiet der Flüssigkristalle im Jahr 1991 den Nobelpreis erhielt.

Diese allgemeinen Aspekte der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung werden aufbauend auf der historisch-szenischen Lerneinheit mit den Schülerinnen und Schülern in einer offenen Diskussionsrunde thematisiert. Auf diese Weise wird ihr Bewusstsein dafür geschärft, dass sich wissenschaftliche Erkenntnisse entwickeln und sich nicht sofort durch offensichtliche Beobachtungen offenbaren. Auch die Schülerinnen und Schüler können zu Beginn der Unterrichtseinheit wie die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen zur Zeit Reinitzers in ihrem alten

Paradigma der klassischen Aggregatzustände gefangen sein und Widerstand bei der Aufgabe ihres bisherigen Erklärungsmodells zeigen.

Damit auch die Jugendlichen in ihrem wissenschaftlichen Bild einen nachhaltigen Paradigmenwechsel vollziehen und ihr bestehendes Modell der Aggregatzustände weiterentwickelt wird, ist es nachfolgend das Ziel, durch eigenes, selbstbestimmtes Experimentieren eine Begründung für eine Krise in ihrem Theoriegebäude zu liefern sowie ein alternatives Modell der Aggregatzustände nachzuvollziehen.

4 Der flüssigkristalline Zustand und seine optischen Eigenschaften

Ziel der nachfolgenden Experimente ist es daher, dass auch die Schülerinnen und Schüler die Existenz eines weiteren Aggregatzustands erfahren, einige seiner faszinierenden Eigenschaften verstehen und in einem gewissen Maße einen Paradigmenwechsel durchlaufen. Dazu werden erneut Parallelen zur historischen Entdeckungsgeschichte gezogen, um ihren Lernprozess mit dem in der Geschichte zu vergleichen. Vorausgesetzt werden dabei Grundkenntnisse über die Polarisation des Lichts, die im Rahmen dieser Unterrichtseinheit auf das Phänomen der Doppelbrechung angewandt werden. Zur Wiederholung der entsprechenden Inhalte sowie zur Erweiterung der Kenntnisse bietet sich eine Kooperation mit dem Physikunterricht an.

Lehmann konzentrierte sich bei seinen Untersuchungen vor allem auch auf die ungewöhnlichen optischen Eigenschaften der neuen Phase. Er brachte dazu Substanzen wie das Cholesterylbenzoat im Zustand zwischen fest und flüssig zwischen zwei senkrecht zueinander stehende Polarisatoren und beobachtete, dass Licht die Anordnung passieren kann. Demzufolge musste die Substanz die Polarisation des Lichtstrahls verändern. Die Teilnehmenden können diese Beobachtung durch die nachfolgenden etablierten Experimente an flüssigkristallinen Medien selbst nachvollziehen (vgl. z. B. [3]): Zunächst wird Wasser (a), ein Calcit-Kristall (e) und ein bei Raumtemperatur flüssigkristalliner Stoff (b) zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren zum Beispiel auf einem Overheadprojektor betrachtet (vgl. Abbildung 2; als Beispiel für b) kann MBBA: N-4-Methoxybenzyliden-4-butylanilin verwendet werden.). Während der Aufbau mit Wasser dunkel bleibt (c), ist an der Anordnung mit dem flüssigkristallinen Medium und

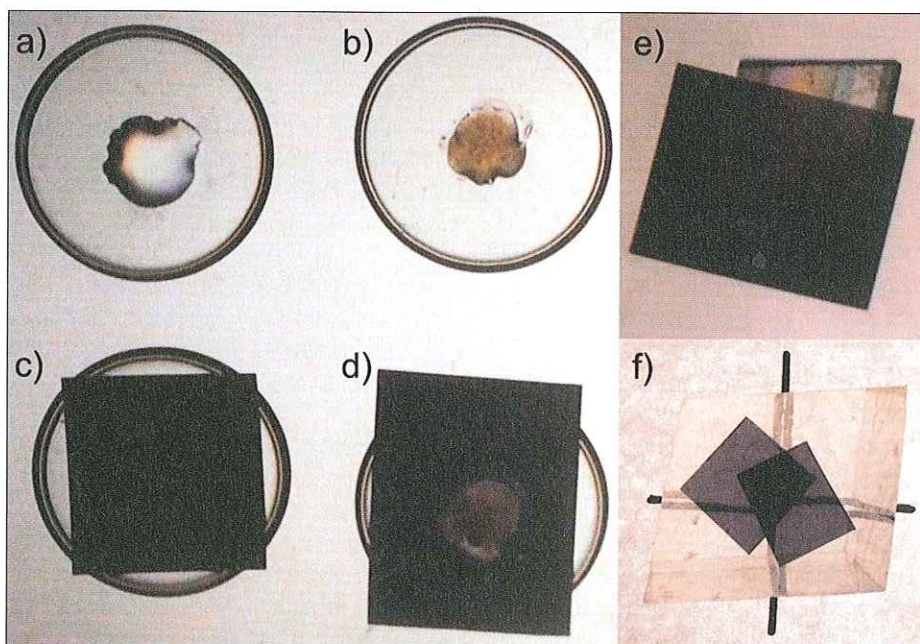


Abb. 2: Wasser (a und c) und eine Substanz im flüssigkristallinen Zustand (b und d) oben ohne und unten mit Polarisationsfilter. Im Bild d) ist eine Aufhellung zu sehen. In e) und f) wird ein Calcit-Kristall auf seine optischen Eigenschaften hinsichtlich der Polarisierung untersucht.

dem Kristall eine Aufhellung zu beobachten (d und e), sodass diese die Polarisation des Lichts verändert haben müssen.

Zur Zeit Lehmanns war bekannt, dass dieser Effekt durch Doppelbrechung hervorgerufen wird, allerdings war diese bisher nur bei Festkörpern wie Calcit beobachtet worden. Denn kristalline Festkörper weisen durch die innere Struktur ihres Raumgitters eine Fernordnung auf, die zu einer Anisotropie und damit Richtungsabhängigkeit vieler physikalischer Eigenschaften wie auch des Brechungsindex führen kann. Ein einfallender Lichtstrahl wird in einem doppelbrechenden Medium durch diese Richtungsabhängigkeit in zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen aufgeteilt, die einen unterschiedlichen Weg im Material nehmen. Ist die Schicht hinreichend dünn, überlagern sich die beiden Lichtstrahlen nach Austritt wieder, wobei der resultierende Strahl dann eine veränderte Polarisation aufweisen kann. Ist die Schicht dagegen hinreichend dick, kann man zwei voneinander getrennte und senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen beobachten. Diese Auftrennung können die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe des Calcit-Kristalls und den Polarisationsfolien selbst nachvollziehen (vgl. Abbildung 2, f). Zu beachten ist, dass sich das Auftreten der blauen Phase nicht über die Doppelbrechung erklären lässt. Dieses Phänomen wurde erst spät durch die selektive Reflexion beschrieben, welche besagt, dass Licht in der Wellenlänge der molekularen

Struktur – und hier damit im blauen Spektralbereich – reflektiert wird [12].

5 Erklärung des neuen Zustands als eine neue Phase

Offensichtlich zeigt das doppelbrechende Medium neben dem Fließverhalten einer Flüssigkeit ebenfalls die optisch anisotropen Eigenschaften eines Kristalls. Klar ist, dass eine isotrope Flüssigkeit kein doppelbrechendes Verhalten aufweisen kann: die Anordnung der Moleküle ändert sich hier stetig und folgt somit keiner Fernordnung, sodass sich auch keine richtungsabhängigen Eigenschaften ausbilden können. Mit den Schülerinnen und Schülern diskutieren wir daher nachfolgend, dass eine gewisse Struktur in flüssigkristallinen Medien vorausgesetzt werden muss, die dazu führt, dass sich unterschiedlich polarisierte Lichtstrahlen anders verhalten können und damit das Material insgesamt ein richtungsabhängiges Verhalten aufweisen kann. In diesem Zustand muss also eine Anisotropie vorliegen, eine Struktur, die zwischen dem 3D-Raumgitter eines Kristalls und der Regellosigkeit einer Flüssigkeit liegt. Genau hier liegt ein zentraler Bruch mit dem bestehenden Paradigma der Schülerinnen und Schüler vor: in einem Modell wie dem der Kugelteilchen, in dem die Bestandteile von Materie entweder völlig regellos oder fest angeordnet vorliegen, kann diese Beobachtung nicht erklärt werden. Dieser scheinbare Widerspruch führt dazu, dass eine andere Erklärung der Beobachtung

gefunden werden muss. Fragt man die Teilnehmenden an dieser Stelle nach einer Vermutung, ergibt sich häufig die Idee eines Zwischenzustands, der nur eine ein- oder zweidimensionale Ordnung aufweist und somit Eigenschaften von flüssig und kristallin vereint – der erste Schritt zu einer korrekten Beschreibung der flüssigkristallinen Phase.

Heute sind über 50.000 Flüssigkristallverbindungen bekannt, die in etwa 20 verschiedenen Phasen vorliegen können und den Phasenübergang in Abhängigkeit von der Temperatur (thermotrop) oder dem Lösungsmittel (lyotrop) ausbilden. Seit der Arbeit von Friedel wird dabei zwischen der cholesterischen, smektischen und nematischen Klasse unterschieden, welche in ihrer Struktur und Anordnung variieren und für verschiedenste Technologien eingesetzt werden. Im Rahmen dieses Artikels werden thermotrope nematische Substanzen in den Vordergrund gestellt, da diese in technischen Anwendungen und vor allem in Displays die größte Rolle spielen (für einen Überblick siehe z. B. [13]).

Wichtig zur Erarbeitung der zugehörigen Grundlagen mit den Schülerinnen und Schülern ist die Beschreibung, dass organische Substanzen mit einer flüssigkristallinen Phase aus Kohlenstoffketten aufgebaut sind und somit meist langgestreckte Moleküle darstellen (daher unter anderem auch der Begriff „nematisch“: griechisch für Faden). Sie zeichnen sich dabei durch starre Mittelteile sowie Endgruppen mit permanenten Dipolmomenten aus. Diese sogenannte Formanisotropie der Moleküle führt zusammen mit den Anziehungskräften zwischen den Dipolen dazu, dass die Moleküle zwar beweglich bleiben, sich über kleine Distanzen aber nicht regellos, sondern mit einer gewissen Ordnung entlang ihrer Längsachse ausrichten. Diese Vorzugsrichtung wird durch den Direktor beschrieben, welcher die gemittelte Orientierung des Molekülembles wiedergibt. Die mittlere Abweichung der Moleküle von diesem Direktor ist temperaturabhängig, gibt die Ordnung der Phase an und wird daher als Ordnungsparameter bezeichnet.

Das Phänomen der Nahordnung und damit das Ausrichten der Molekülachsen kann den Schülerinnen und Schülern mit Hilfe von Rooibos-Tee veranschaulicht werden, dessen ganze Blätter nahezu Stäbchenform besitzen. Hier bildet sich beim Aufgießen an der Wasseroberfläche ein Film, in dem sich die Blätter in kleinen Regionen parallel zueinander anordnen

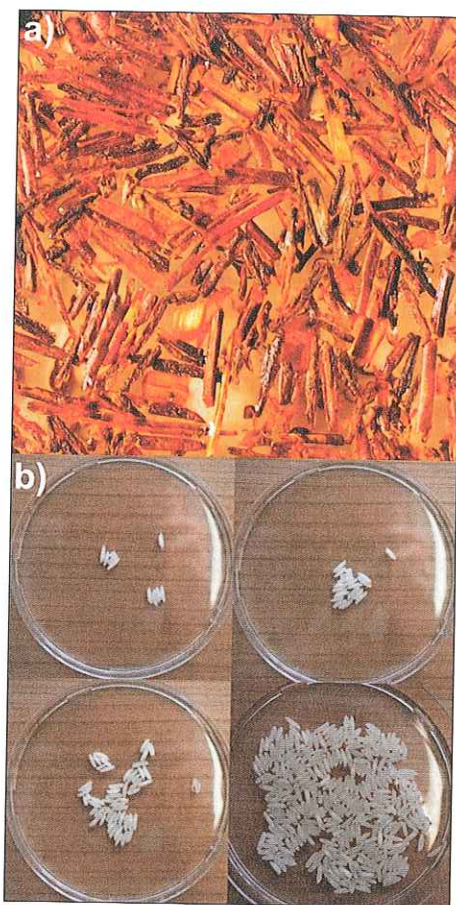


Abb. 3: Veranschaulichung des Ausbildens der nematischen Phase mit Hilfe von Rooibos-Tee (a) und ungekochten Reiskörnern (b) auf Wasser.

und somit der Struktur in flüssigkristallinen Materialien ähneln (Abbildung 4a) [14]. Alternativ kann zur Veranschaulichung das von uns entwickelte Reis-Modell genutzt werden, welches sich dadurch auszeichnet, dass dieser Alltagsgegenstand bekannt und in jedem Haushalt verfügbar ist, die Reiskörner deutlich größer und somit besser sichtbar sind, sowie bei der Herstellung des Modells mehr Aktivität durch die Jugendlichen gefordert ist. Für dieses Modell füllt man eine flache Schale mit wenig Wasser und lässt nach und nach Reiskörner hineinfallen, die sich wie die Blätter des Rooibos-Tees parallel zueinander anordnen (Abbildung 4b). Im flüssigkristallinen Medium entsteht durch eine derartige Parallelstellung der Längsachsen der Moleküle eine eindimensionale Ordnung, wobei die Beweglichkeit längs dieser Achsen und damit das Fließverhalten erhalten bleibt – in diesem Zustand besitzt die Substanz somit Eigenschaften der kristallinen und flüssigen Phase.

Der flüssigkristalline Zustand stellt einen Zwischenzustand zwischen den bekannten klassischen Aggregatzuständen dar: Erhitzt man eine flüssigkristalline Substanz weiter, hebt sich die Ordnung

aufgrund der thermischen Bewegung auf und die Substanz wird isotrop und damit flüssig (sinkender Ordnungsparameter), kühlt man sie hingegen weiter ab, dominieren die Bindungskräfte zwischen den Molekülen und es bildet sich ein Kristall (steigender Ordnungsparameter). Somit knüpft das neue Modell der flüssigkristallinen Phase durch seine „Extremformen“ an das bisherige Verständnis der Schülerinnen und Schüler an. Durch den Aspekt der Formanisotropie und der Erweiterung des Kugelteilchenmodells auf eine Berücksichtigung der Molekülgestalt bietet dieses Modell Raum für die Erklärung eines weiteren Aggregatzustands, mit Hilfe dessen die Beobachtungen gedeutet werden, eine neue Phase erklärbar wird, und auch die bisherigen Aggregatzustände integriert werden.

6 Die Anwendung von nematischen Flüssigkristallen in Displays – die TN-Zelle

Aufbauend auf den neuen Erkenntnissen der Schülerinnen und Schüler können Anwendungen nematischer flüssigkristalliner Materialien in ihrer Lebenswelt diskutiert werden. Denn neben der optischen Richtungsabhängigkeit weisen flüssigkristalline Materialien auch eine Anisotropie der elektrischen Eigenschaften auf, die zur Entwicklung der sogenannten Schadt-Helfrich-Zelle führten und damit ihre bis heute bedeutende Anwendung in Displays ermöglichten: Aufgrund des inneren Aufbaus weisen die Moleküle entlang ihrer Längsachse größere permanente und induzierbare elektrische Dipolmomente auf. Daher richtet sich diese Achse in einem elektrischen Feld entlang der Feldlinien aus. Schadt und Helfrich nutzten darauf aufbauend eine besondere, verdrehte Geometrie, um elektrisch schaltbare Anzeigeelemente zu konstruieren: Strukturiert man eine Oberfläche beispielsweise mit feinen Rillen, richten sich die naheliegenden Moleküle aufgrund der oben erklärten Nahordnung mit ihrer Längsachse parallel zu diesen aus. Begrenzt man nun eine nematische flüssigkristalline Substanz zwischen zwei senkrecht zueinander strukturierten Oberflächen, erfolgt aufgrund der besonderen Randbedingungen eine Verdrillung der Molekülachsen über die Dicke der Zelle um 90° („twisted nematic cell, TN-Zelle“ oder Schadt-Helfrich-Zelle). Die resultierende Zelle hat besondere optische Eigenschaften: fällt Licht mit einer Polarisation parallel zur Ausrichtung der Längsachse auf die erste Schicht, folgt die Polarisati-

onsrichtung des Lichts der Verdrillung der Moleküle und hat sich nach Durchlaufen der Zelle um 90° gedreht. Bringt man nun diese Zelle zwischen zwei parallel zur Oberflächenstrukturierung orientierte und damit gekreuzte Polarisationsfilter, ermöglicht dieses Phänomen eine vollständige Transmission des eingefallenen Lichts – die Zelle erscheint hell. Legt man hingegen eine elektrische Spannung an die Anordnung an, hebt sich die Verdrillung aufgrund der wirkenden elektrischen Kräfte auf und die Moleküle richten sich entlang der Feldlinien aus, sodass die Zelle dunkel erscheint. Mit Hilfe der Idee dieser schaltbaren Anzeigeelemente werden bis heute Displays z. B. in einem Computerbildschirm konstruiert.

7 Der optische Zeno-Effekt

Die Verdrillung der Molekülachsen könnte den Schülerinnen und Schülern durch entsprechende Abbildungen veranschaulicht werden, begreifbare Modelle sind hier jedoch wesentlich wirkungsvoller. Klassische Modelle gehen dabei von z. B. mit Klebeband locker verbundenen Holzspießen aus, die so zum nächsten Nachbarn verdrillt werden können (Abbildung 5 a). Dieses Modell kann jedoch die Nahordnung und die wirkenden Kräfte nur unzureichend abbilden.

Um die wirkenden Molekülkräfte anschaulich überzeugend miteinzubeziehen, bietet es sich an, die Struktur der Zelle über eine Anordnung aus Magneten mit geeigneter Form darzustellen („Zwitschermagnete“, Abbildung 5 b): Verdreht man die begrenzenden Elemente um 90° zueinander, passen sich die innen liegenden Magnete ebenfalls mit einer Verdrillung um 90° dazu an (vgl. Abbildung 5 b). Schwieriger ist es für die Schülerinnen und Schüler, die Drehung der Polarisationsachse des Lichts in der TN-Zelle nachzuvollziehen. Um dies erfahrbar zu ma-

chen, verwenden wir ein Modell, das an den optischen Zeno-Effekt angelehnt ist.

Wie erläutert, wird die Änderung der Polarisations-eigenschaften von Licht in einem flüssigkristallinen Medium durch dessen doppelbrechende Eigenschaften hervorgerufen. Theoretisch beschrieben werden die optischen Eigenschaften einer TN-Zelle durch die makroskopische Näherung auf der Basis der Nahordnung, dass die Zelle in dünne Schichten senkrecht zur Verdrillungsachse zerlegt werden kann, in denen die Ausrichtung der Moleküle jeweils konstant ist. Jede Schicht verhält sich damit wie ein einachsiger doppelbrechender Kristall, der die Polarisationsachse des Lichts geringfügig verändert. Auf Basis der physikalischen Grundlagen zur Doppelbrechung lässt sich dann theoretisch nachvollziehen, dass die gesamte Anordnung – mit einer Vielzahl zueinander verkippter Schichten – linear polarisiertes Licht, welches parallel zur optischen Achse der ersten Schicht einfällt, in der Polarisationsachse um 90° dreht [15].

Um den Schülerinnen und Schülern diesen Effekt näher zu bringen, nutzen wir die Möglichkeit der Analogie einer Schicht gleichgerichteter Moleküle mit einer Polarisationsfolie. Bekanntermaßen lässt eine Polarisationsfolie Licht mit einer Polarisationsachse parallel zur Transmissionsrichtung passieren und absorbiert den verbleibenden Anteil. Angenommen wird nun, dass das von der Folie transmittierte Licht dem Teil des Lichts entspricht, der parallel zur optischen Achse und damit zur Längsachse der Moleküle polarisiert ist. Für eine doppelbrechende Schicht mit beliebigem Winkel zwischen optischer Achse und Polarisationsachse des einfallenden Lichts ist dieses Modell sicherlich inadäquat, da der zweite Teil des Strahls in unserem Modell verschwindet. Nimmt man aber an, dass das einfallende Licht wie auch in der obigen Näherung einer TN-Zelle linear polarisiert ist, die Schicht hinreichend dünn und der Winkel zwischen der Polarisationsachse des Lichts und der optischen Achse des doppelbrechenden Medium sehr klein ist, ist diese Näherung angemessen.

Die Schülerinnen und Schüler führen nun folgendes Experiment durch: zwei Polarisationsfolien werden am Anfang und Ende eines Halters (z. B. aus Styropor) mit senkrecht zueinander liegender Transmissionsrichtung positioniert. In dieser Anordnung lassen die Folien kein Licht durch (vgl. Abbildung 6 a). Nun werden beliebig viele weitere Polarisationsfolien hinzugefügt, die in ihrer Transmissions-

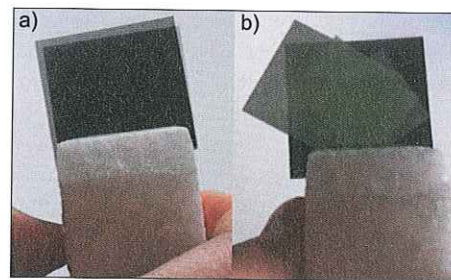


Abb. 6: Zwei gekreuzte Polarisationsfolien transmittieren kein Licht (a), bringt man jedoch weitere Folien mit einem kleinen Winkel ein, ist eine Transmission zu beobachten (b).

achse um einen möglichst kleinen Winkel gegenüber der vorhergehenden Folie verkippt sind. Sie entsprechen den aufeinander folgenden und in der Summe um 90° verdrillten Schichten der flüssigkristallinen Substanz. Nun ist eine deutliche Aufhellung zu beobachten – ein Teil des Lichts kann die Anordnung verlassen (vgl. Abbildung 6 b). Dieses Phänomen wird als optischer Zeno-Effekt bezeichnet und lässt sich mit Hilfe des Gesetzes von Malus mathematisch nachvollziehen. Offensichtlich führt hier eine Vielzahl von Folien, die alle um einen möglichst kleinen Winkel α zu der vorhergehenden Folie verkippt sind, im Grenzfall zu einer vollständigen Transmission und Drehung der Polarisationsachse des Lichts – wie auch in einer TN-Zelle.

8 Eigenbau einer Flüssigkristallzelle

Zum Abschluss dieser Unterrichtseinheit können die Jugendlichen die Eigenschaften und Anwendungen der flüssigkristallinen Phase zum Bau einer eigenen Flüssigkristallzelle einsetzen. Zugehörige Bausätze mit den benötigten Materialien können im Handel erworben werden, hier verwendet wird der Praktikumsbausatz der Laborbedarf-firma Dietrich & Co. [16]. Auf diese Weise werden die behandelten Grundlagen abschließend beim eigenen Experimentieren vertieft und die Anwendung des nicht-klassischen Aggregatzustands im alltäglichen Leben nachvollzogen.

Im ersten Schritt wird auf eine mit Indium und Zinn beschichtete leitfähige Glasplatte ein beliebiges Symbol mit einem wasserfesten Stift gezeichnet und zum späteren Anschluss an eine Stromquelle über eine Linie mit einer Kante der Glasplatte verbunden (siehe Abbildung 7). Eine zweite Glasplatte der gleichen Größe bleibt als Gegenstück zunächst unbehandelt. Die Fläche außerhalb des Symbols wird mit Hilfe verdünnter Salzsäure von der leitfähigen Schicht befreit und der wasserfeste Stift nachfolgend mit einem geeigneten Lösungsmittel wieder

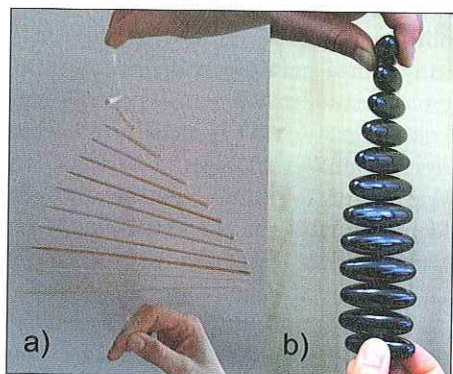


Abb. 4: Die Drehung einer TN-Zelle wird mit Hilfe von Holzspießen und Klebeband (a) oder Zwitschermagneten (b) veranschaulicht.



Abb. 7: Ein Schüler beim Bau einer Flüssigkristallzelle.



Abb. 8: Ein Exponat zur Erkundung der Funktionsweise eines Handy-Displays.

entfernt. Somit entsteht eine Elektrodenstruktur in der Form der Stiftzeichnung. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit wird die vorhandene Indium-Zinn-Schicht auf beiden Glasplatten mit einem Heißluftfön oxidiert und mögliche Fettreste in einem alkalischen Reinigungsbad abgelöst. Mit Hilfe eines groben Zellstofftuches erfolgt nun durch mehrfaches Reiben in eine Richtung eine Vorstrukturierung der leitfähigen Schicht der beiden Glasplatten – die Moleküle des flüssigkristallinen Materials ordnen sich später nahe der Glasplatten parallel zu diesen Rillen an. Zur Erzeugung einer um 90° verdrehten Struktur werden die beiden Glasplatten mit senkrecht zueinander liegenden Rillen mit der leitfähigen Schicht nach innen versetzt mit Zwei-Komponenten Kleber aufeinander geklebt, und zwar so, dass an die leitfähigen Bereiche beider Platten später eine Spannung angelegt werden kann. Abstandshalterfolien von wenigen Mikrometern Dicke an den Seiten der Glasplatten sorgen dabei für einen kleinen Zwischenraum in der Zelle. Nachfolgend wird ein bei Raumtemperatur im flüssigkristallinen Zustand vorliegendes Material auf die Kanten getropft, welches sich über Kapillarkräfte ins Innere der Zelle bewegt. Abschließend werden die offenen Kanten mit Kleber versiegelt. Auf die beiden Seiten der Zelle werden nun Polarisationsfolien mit senkrechter Ausrichtung zueinander geklebt. Fällt Licht auf die Zelle, passiert es den ersten Polarisationsfilter, wird durch die Flüssigkristallstruktur in der Polarisation um 90° gedreht und kann die Zelle wieder verlassen. Legt man an die Zelle nun eine Spannung von 5V an, hebt man die Drehung der Polarisationsachse durch die Flüssigkristallstruktur im Bereich des zu-

vor gezeichneten Symbols und somit im leitenden Bereich auf – dieser erscheint dunkel. Dies ist das Grundprinzip in einfachen flüssigkristallinen Bildschirmen, wie den Schülerinnen und Schülern abschließend an einem in seine Einzelteile zerlegten Displays eines Handys in der aktuellen, weiter entwickelten Ansteuerung von Millionen solcher Einzelelemente („Pixel“) gezeigt wird (siehe Abbildung 8).

Fazit – Alltägliche Anwendung eines nicht-klassischen Aggregatzustands.

Das in diesem Beitrag vorgestellte, auf forschendem Lernen an Experimenten ausgerichtete Unterrichtskonzept rund um die Thematik der flüssigkristallinen Phase eignet sich besonders dazu, Jugendlichen durch ein wissenschaftstheoretisches Hinterfragen den Einfluss vorherrschender theoretischer Weltbilder auf den naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess zu verdeutlichen. Denn das Nacherleben der historischen Entdeckungsgeschichte zeigt auf, dass neue wissenschaftliche Erkenntnisse nicht einfach und sofort als „Wahrheit“ aufgedeckt werden, sondern häufig durch bestehende Theorien beeinflusst und gegebenenfalls inadäquat gedeutet werden. Darüber hinaus ermöglicht das Experimentieren von den Grundlagen der flüssigkristallinen Phase bis hin zu deren Anwendungen auch einen Einblick in die aktuelle optische Technologie der Flüssigkristalldisplays. Das eigenbestimmte, experimentbasierte forschende Erkunden dieser alltäglichen Technologie, kombiniert mit verschiedenen Modellen zur Veranschaulichung der Eigenschaften der neuen Phase führt zusätzlich zu neuem, vertieftem fachlichen Wissen und einer gesteigerten Technikmündigkeit gegenüber einer Alltagstechnologie. ■

Literatur

- [1] T. Chuard, Was sind Flüssigkristalle? Praxis der Naturwissenschaften Chemie in der Schule, **56** (6), S.6–10 (2007)
- [2] M. Pötter, Flüssigkristalle unter dem Mikroskop? Praxis der Naturwissenschaften Chemie in der Schule, **56** (6), S.21–24 (2007)
- [3] F. Oestreicher, Demonstrationsexperimente mit Flüssigkristallen. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, **48** (1), S. 4–12 (1995)
- [4] B. Priemer, Deutschsprachige Verfahren der Erfassung von epistemologischen Überzeugungen. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften **12**, S.159–175 (2006)
- [5] T. Geelhaar, 125 Jahre Flüssigkristalle – die wissenschaftliche Revolution im Wohnzimmer. Angewandte Chemie, **125**, S. 8960–8971 (2013)
- [6] F. Reinitzer, Beiträge zur Kenntnis des Cholesterins. Sitzungsbericht der kaiserlichen Akademie der Wissenschaft **94**, S.412–441 (1888)
- [7] O. Lehmann, Flüssige Kristalle und Kolloide. Kolloid-Zeitschrift **15**, S. 65–75 (1914)
- [8] J. Born, Die Entdeckung der Flüssigkristalle und der Briefwechsel zwischen F. Reinitzer und O. Lehmann. Zur Didaktik der Physik und Chemie Tagung 1997, S. 188–190 (1998)
- [9] M. Carrier, „Die Theoriebeladenheit der Beobachtung“ in „Wissenschaftstheorie zur Einführung“. Junius Verlag, S. 55–94 (2006)
- [10] T. Kuhn, Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp Verlag 1996
- [11] G. Meier, Flüssige Kristalle. Physikalische Blätter, **27** (3), S. 110–118 (1971)
- [12] H.-R. Trebin, Flüssigkristalline Blaue Phasen. Physikalische Blätter, **44** (7), S. 221–226 (1988)
- [13] H. Kawamoto, The History of Liquid-Crystal Displays, Proceedings of the IEE, **90** (4), S. 460–500 (2002)
- [14] M. Ringel, Ein molekulares Cluster-Modell zur Beschreibung von n/i-Phasenübergängen in Flüssigkristallen. Dissertation, Universität Ulm (2003)
- [15] B. Saleh, Fundamentals of Photonics. Wiley Verlag 2007, S. 232–234
- [16] W. Dietrich & Co., Praktikumsbausatz „LCD-Herstellung“, Gutzmannstraße 11, Berlin, weitere Informationen unter www.fluessigkristalle.com

Anschrift der Verfasser:

Annika Kruse, Jessica Twardon, Cornelia Denz, Münsters Experimentierlabor (MExLab) Physik und Institut für Angewandte Physik Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstraße 2/4, 48149 Münster annika.kruse@uni-muenster.de