

VERSUCHSBERICHT ZU

MP5 - WEICHE MATERIE: PHYSIK DER
FLÜSSIGEN KRISTALLE

Gruppe BA-C-04

Alexander Neuwirth (E-Mail: a_neuw01@wwu.de)
Leonhard Segger (E-Mail: l_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 10.12.2018
betreut von
Aaron Rigoni

2. Februar 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	3
2	Theorie	3
3	Methoden	6
3.1	Herstellung der Flüssigkristallanzeige	6
3.2	Bestimmung der elektrooptischen Kennline	7
3.3	Bestimmung der kritischen Temperatur eines Flüssigkristalls	7
4	Ergebnisse und Diskussion	7
4.1	Bestimmung der Kennlinien der LC-Displays	7
4.1.1	Unsicherheiten	7
4.1.2	Beobachtung und Datenanalyse	7
4.1.3	Diskussion	10
4.2	Bestimmung der kritischen Temperatur eines Flüssigkristalls	11
4.2.1	Unsicherheiten	11
4.2.2	Beobachtung und Datenanalyse	12
4.2.3	Diskussion	12
5	Schlussfolgerung	13

1 Kurzfassung

Flüssigkristalle besitzen einige ungewöhnliche Eigenschaften, die es erlauben, mit ihnen eine spannungsgesteuerte Anzeige zu konstruieren. In diesem Versuch soll einerseits eine solche Flüssigkristallanzeige (LCD, „Liquid Crystal Display“) angefertigt werden und auf ihre Charakteristik untersucht werden. Dabei wird festgestellt, dass diese selbst gebaute Flüssigkristallanzeige den Erwartungen an eine solche genügt, aber im Vergleich zu der industriell gefertigten deutlich schlechtere Eigenschaften bietet. Andererseits soll die sogenannte kritische Temperatur eines Flüssigkristalls bestimmt werden, ab der die Flüssigkristalleigenschaften verschwinden. Hierfür wird der Effekt der Doppelbrechung von Flüssigkristallen ausgenutzt und gemessen, ab welcher Temperatur dieser Effekt verschwindet. Dies ist möglich, aber wird in seiner Präzision durch die Art der Versuchsdurchführung und den Aufbau stark eingeschränkt.

2 Theorie

Flüssigkristalle zeichnen sich dadurch aus, dass sie mindestens unter bestimmten Bedingungen eine Orientierungsfernordnung, aber keine vollständige Positionsfernordnung, aufweisen, womit sie sich in letzterem Punkt von „gewöhnlichen“ Kristallen unterscheiden. Positionsfernordnung bezeichnet hierbei eine Anordnung im Raum, die sich durch das periodische Fortsetzen einer Einheitszelle beschreiben lässt. Eine unvollständige Positionsfernordnung meint eine Periodizität in nur einer oder nur zwei Dimensionen. Orientierungsfernordnung meint, dass eine Vorzugsrichtung der Längsachsen der Moleküle des Flüssigkristalls existiert. Diese ist periodisch ortsabhängig oder konstant. Der Grad der Ordnung lässt sich als die Größe der durchschnittlichen Abweichung von der Vorzugsrichtung verstehen.

Für die Herstellung von Flüssigkristallanzeigen wird ein Flüssigkristall in cholesterischer Phase verwendet. Dies meint, dass die Molekülachsen ebenenweise in die gleiche Richtung zeigen. Die Orientierung in den Ebenen ist dabei periodisch, da der Direktor sich, wenn in Laufrichtung senkrecht zur Ebene betrachtet, mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dreht und eine Helixstruktur bildet, wenn das Ende des Direktorvektors verfolgt wird.

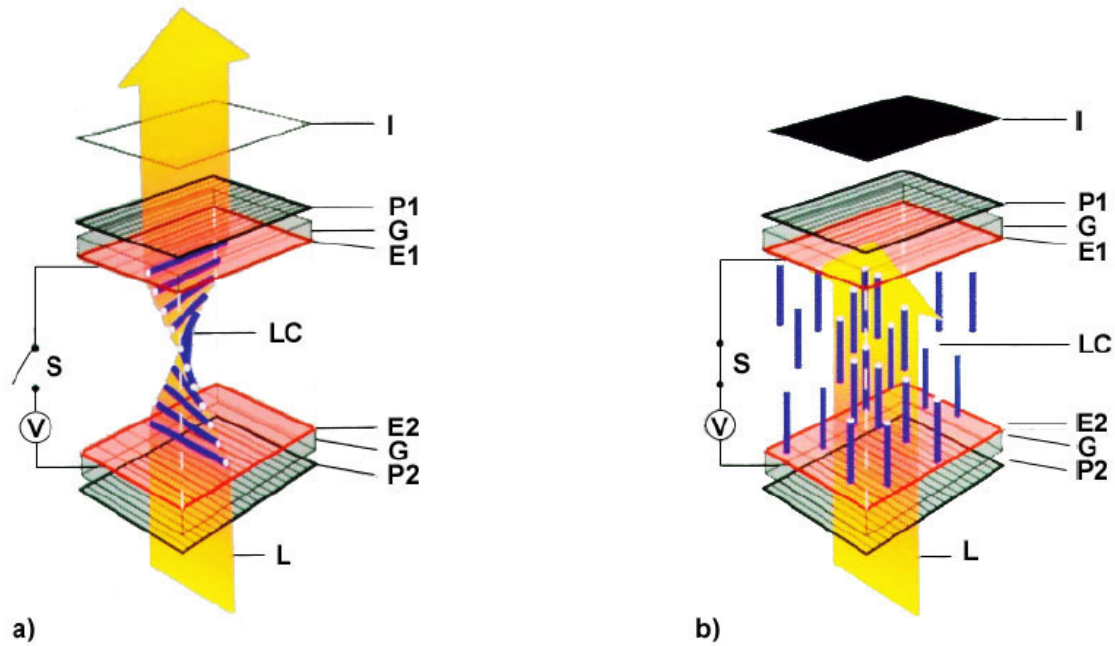


Abbildung 1: Polarisationsrichtung in der Flüssigkristallanzeige. a) ohne angelegte Spannung. b) bei angelegter Spannung. E1, E2: Elektroden (ITO); G: Glasplatten; I: Lichtintensität; L: Lichtwelle; LC: Flüssigkristall; P1, P2: Polarisatoren; S: Schalter, V: Spannungsquelle. [1]

Dies erlaubt den Bau einer Flüssigkristallanzeige, da in einem Flüssigkristall in cholesterischer Mesophase die Polarisation des Lichtes, wenn es entlang besagter Laufrichtung einfällt, der Helixform des Direktors folgt. Wenn bekannt ist, mit welcher Ganghöhe (Länge der Helix bei einer Umdrehung des Direktors) der Kristall vorliegt, kann auf der Ausgangsseite des Displays linear polarisiertes Licht einen Polfilter passieren, wenn dieser zur Einfallsrichtung soweit gedreht ist, wie sich der Direktor über die Dicke des Flüssigkristalls im Display dreht. Im Folgenden wird hierfür eine Vierteldrehung verwendet. Wie gleich deutlich wird, sind hier nur Drehungen um $\frac{\pi(2z+1)}{2}$ mit $z \in \mathbb{Z}$ praktikabel. Da für die lineare Polarisation des einfallenden Lichtes ebenfalls ein Polfilter verwendet wird, ist eine solche Flüssigkristallanzeige bidirektional. Wenn jetzt im Flüssigkristall ein annähernd homogenes elektrisches Feld angelegt wird, richten sich die Molekülachsen statt nach der Helixstruktur mit zunehmender Feldstärke zunehmend eher nach dem Feld aus (vgl. Abb. 1). Dies verhindert, dass sich die Polarisation des Lichtes im Innern ändert, weshalb bei einer der oben genannten Drehungen der Polarisationsfilter zueinander das Licht den zweiten Polarisationsfilter nicht passieren kann.

Demnach ist eine spannungsgesteuerte Schaltung der Durchlässigkeit des Filters möglich und wenn hinter das Display eine Lichtquelle oder ein Spiegel gebracht wird, kann die Zelle als Pixel einer größeren Anzeige verwendet werden. Bei Farbdisplays werden Pixel aus drei Subpixeln zusammengesetzt, welche wiederum aus einer spannungsgesteuerten

Flüssigkristallanzeige mit einem Farbfilter (Rot, Grün, Blau) bestehen.

Flüssigkristalldisplays werden mit Wechselspannung betrieben, da eine Gleichspannung die elektrolytische Zersetzung des Flüssigkristalls zufolge hätte.

Für die Messung wird eine Photodiode verwendet. Diese wird über einen Widerstand kurzgeschlossen und die Spannung über den Widerstand gemessen. Diese ist im Messbereich proportional zum Photostrom, welcher als im Messbereich proportional zur Intensität des eintreffenden Lichts angenommen wird.

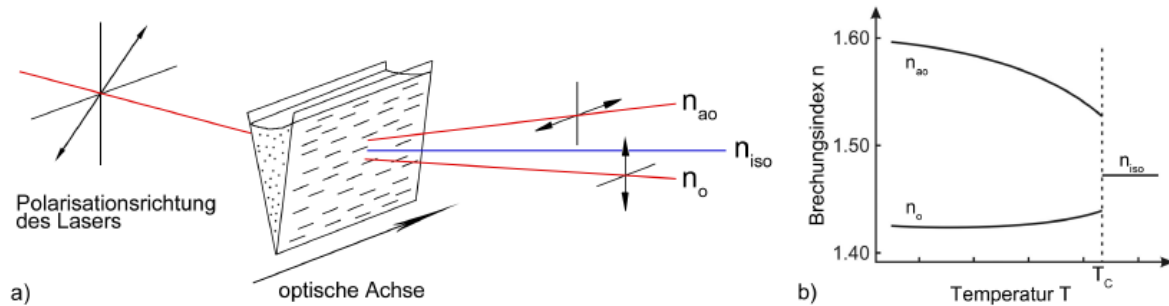


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau zur Messung der kritischen Temperatur des Übergangs eines Flüssigkristalls von der nematischen in die isotrope Phase. [2]

Flüssigkristalle weisen einen polarisationsabhängigen Brechungsindex auf, da die Molekülelektronen je nach Orientierung der Moleküle und Schwingungsrichtung sich gegenseitig unterschiedlich stark zum Schwingen anregen. Dies führt bei einem Strahl, der nicht bereits entweder senkrecht oder parallel zur optischen Achse polarisiert ist, zum Phänomen der Doppelbrechung. Der Strahl spaltet in zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlen auf. Diese Aufspaltung wird maximal, wenn der einfallende Strahl senkrecht zum Direktor steht. Wenn der Flüssigkristall in einem keilförmigen Gefäß ist, behält der Strahl nach dem Austritt aus dem Kristall eine Winkelaufspaltung, weshalb in größerem Abstand die Aufspaltung einfacher gemessen werden kann (vgl. Abb. 2). In einem plan-parallelen Aufbau würden die Strahlen nach dem Austritt aus dem Kristall wieder parallel verlaufen und die Ortsaufspaltung würde nicht mit dem Messabstand steigen. Die Differenz der Brechungsindizes ist dabei direkt abhängig vom Ordnungsgrad, weshalb sie als ein Maß für diesen verwendet werden kann.

Bei steigender Temperatur steigt die mittlere Abweichung der Molekülachsen vom Direktor und damit sinkt der Ordnungsgrad und die Differenz der Brechungsindizes. Ab einer bestimmten, materialabhängigen kritischen Temperatur verliert der Flüssigkristall seine Orientierungsfernordnung vollständig und das Phänomen der Doppelbrechung verschwindet.

3 Methoden

3.1 Herstellung der Flüssigkristallanzeige

Es werden rechteckige Glasplatten verwendet, auf die zuvor eine Schicht aus Indiumzinnoxid aufgebracht wurde. Dies erlaubt eine einseitige elektrische Leitfähigkeit der Schichten, die nötig ist, um später ein elektrisches Feld anlegen zu können. Die Glasplatten werden zunächst in einem Ultraschallbad von Verunreinigungen auf der Oberfläche befreit. Mit einem Multimeter wird die leitende Seite der Platten bestimmt. Auf diese Seite werden bei beiden Platten Rillen entlang der langen Seite der Platten durch wiederholtes unidirektionales Reiben mit einem Tuch aufgebracht. Dann werden die Platten im 90° -Winkel aufeinander gelegt, wobei $15\text{ }\mu\text{m}$ dicke Polyethylenstreifen auf zwei gegenüberliegenden Seiten als Abstandshalter verwendet werden (vgl. Abb. 3), damit zwischen den Platten im Folgenden eine konstante Schichtdicke des Flüssigkristalls eindringen kann. Beim Aufeinanderlegen wird je eine der Ecken der Platten aneinander ausgerichtet, sodass von beiden Platten ein Stück übersteht, an das später der Kontakt angebracht werden kann. Der 90° -Winkel ist wichtig, damit sich die Flüssigkristallmoleküle daran ausrichten und sich die Helixstruktur der cholesterischen Phase mit der Ganghöhe $p = 4h$ ausbildet, wenn h der Abstand der Glasplatten ($15\text{ }\mu\text{m}$) ist, sodass die Moleküle sich zwischen den Platten um 90° drehen. Dann werden zunächst die beiden Seiten mit Abstandshalter mit Zweikomponentenkleber bestrichen, um sie abzudichten und gewartet, bis er ausgehärtet ist. Dann wird mit einer Spitze ein Tropfen Flüssigkristall auf eine der noch offenen Seiten gebracht. Für die Verteilung im Innern der Anzeige wird die Kapillarität ausgenutzt. Sobald der Flüssigkristall im Innern verteilt ist, werden die übrigen Seiten mit Kleber verschlossen. Zuletzt werden Polarisationsfilter im 90° -Winkel zueinander auf die Außenseiten der Flüssigkristallanzeige geklebt.

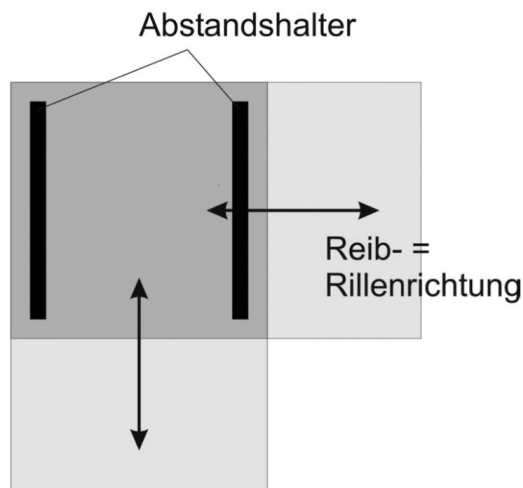


Abbildung 3: Konstruktionsskizze des LC-Displays [2]. Die Rillen in beiden Platten stehen senkrecht aufeinander.

3.2 Bestimmung der elektrooptischen Kennline

An den überstehenden Flächen der Flüssigkristallanzeige wird über Krokodilklemmen eine Spannung angelegt und zunächst eine qualitative Beobachtung des Verdunklungsvorgangs beim Erhöhen der Spannung von 0 V bis 8 V durchgeführt. Gleiches wird für eine kommerziell erhältliche, industriell gefertigte LC-Anzeige durchgeführt. Dann werden die Anzeigen nacheinander zwischen eine Lampe und eine Photodiode gebracht und die Spannung an der Photodiode bei schrittweiser Erhöhung der Spannung an der Anzeige gemessen.

3.3 Bestimmung der kritischen Temperatur eines Flüssigkristalls

Der Effekt der Doppelbrechung wird ausgenutzt, um die Temperatur zu bestimmen, ab der ein untersuchter Flüssigkristall seine Eigenschaften als solcher (also seine Orientierungsfernordnung) verliert. Um die Orientierungsfernordnung indirekt zu messen, wird die Doppelbrechung des Kristalls beobachtet. Hierzu wird ein Laserstrahl auf ein keilförmiges Gefäß mit einem Flüssigkristall im Innern gerichtet. Durch die Doppelbrechung spaltet dieser in zwei unterschiedlich polarisierte Strahlen auf. Jetzt wird mit einem Peltierelement die Temperatur des Flüssigkristalls langsam erhöht und dabei der Abstand der Teilstrahlen mit einem Millimeterpapier gemessen. Die Temperatur, ab der der Abstand der Teilstrahlen verschwindet, entspricht der kritischen Temperatur des Phasenübergangs von nematischer zu isotroper Phase.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Bestimmung der Kennlinien der LC-Displays

4.1.1 Unsicherheiten

Beide Spannungen werden von einer digitalen Anzeige abgelesen. Mit einer Rechteckverteilung ergibt sich für die Spannung U_{LCD} mit welcher das Display betrieben wird $u(U_{LCD}) = 0,000\,03\text{ V}$ und für die der Photodiode $u(U_{Ph}) = 0,0003\text{ V}$. Da beide Anzeigen stark in den letzten Ziffern schwanken, wird die Breite der Schwankungen mit

- $u(U_{LCD}) = 0,001\text{ V}$
- $u(U_{Ph}) = 0,003\text{ V}$

abgeschätzt, wohingegen die Displayunsicherheiten verschwinden. Da die Schwankungen der Diodenspannung deutlich größer im Bereich von 10% bis 90% Transmission ist, wird dort die doppelte Unsicherheit verwendet.

4.1.2 Beobachtung und Datenanalyse

Beim Betrieb des selbst gebauten und industriellen Displays lässt sich feststellen, dass sie erwartungsgemäß dunkler, bzw. weniger lichtdurchlässig werden, wenn man die angelegte

Spannung erhöht. Das selbst gebaute Display flimmert leicht und wird auch bei höheren Spannungen nicht so dunkel wie das industriell gefertigte Display.

Um von der an der Photodiode gemessenen Spannung auf die relative Transmission zu schließen, wird

$$T = \frac{U - U_{max}}{U_{max} - U_{min}} \quad (1)$$

verwendet, da sie hierdurch auf $0 \leq T \leq 1$ normiert wird. Dabei ergibt sich die kombinierte Standardunsicherheit

$$\begin{aligned} u(T) &= \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{u(U)}{U_{max} - U_{min}} \right)^2 + \left(\frac{u(U_{max})(U_{min} - U)}{(U_{max} - U_{min})^2} \right)^2 + \left(\frac{u(U_{min})(U - U_{max})}{(U_{max} - U_{min})^2} \right)^2} \\ &= \frac{\sqrt{(\alpha^2 + 1)(U_{max} - U_{min})^2 + 2U_{max}U_{min} + 2U(U - U_{max} - U_{min})}}{(U_{max} - U_{min})^2} u(U_{max}), \end{aligned}$$

wobei

$$u(U) = \alpha u(U_{max}) = \alpha u(U_{min})$$

verwendet wurde.

Mittels der Werte aus Tabelle 1 lassen sich die Messpunkte in die Kennlinien in Abb. 4 und Abb. 5 transformieren.

Tabelle 1: Maximal und minimal gemessene Spannungen beim Bestimmen der Kennlinie des selbst gebauten und industriell gefertigten Displays mittels einer Photodiode.

	industriell	selbst gebaut
U_{max}	$(2,414 \pm 0,003) \text{ V}$	$(1,866 \pm 0,003) \text{ V}$
U_{min}	$(0,047 \pm 0,003) \text{ V}$	$(0,360 \pm 0,003) \text{ V}$

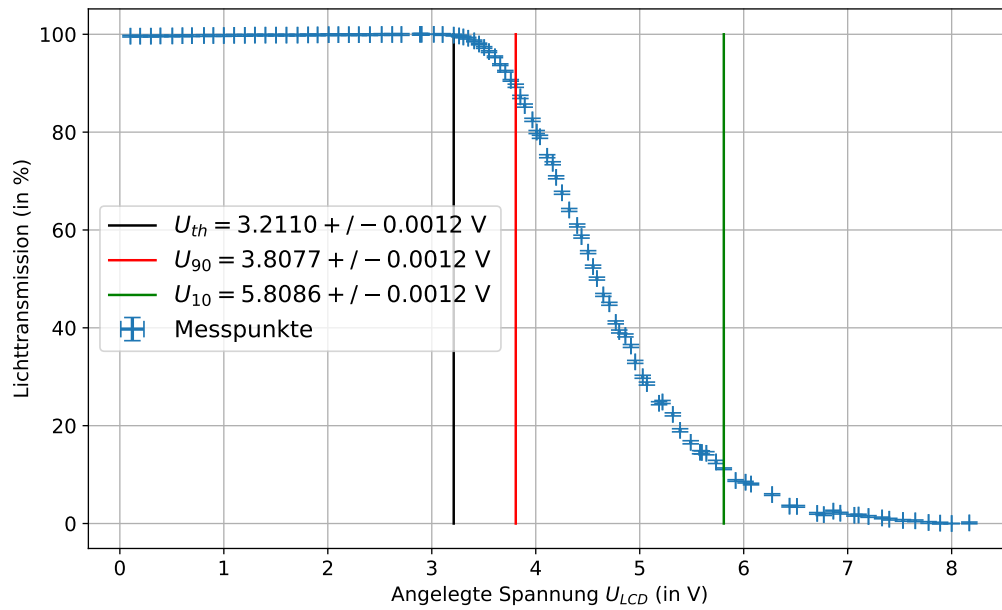


Abbildung 4: Kennlinie des industriell hergestellten LC-Displays. Die schwarze Senkrechte liegt bei der Schwellspannung, welche mindestens am Display anliegen muss, um einen Unterschied in der Transmissivität messen zu können. Die rote (grüne) dagegen liegt bei der Spannung, bei der eine Transmission von 90% (10%) durch das Display gemessen wurde.

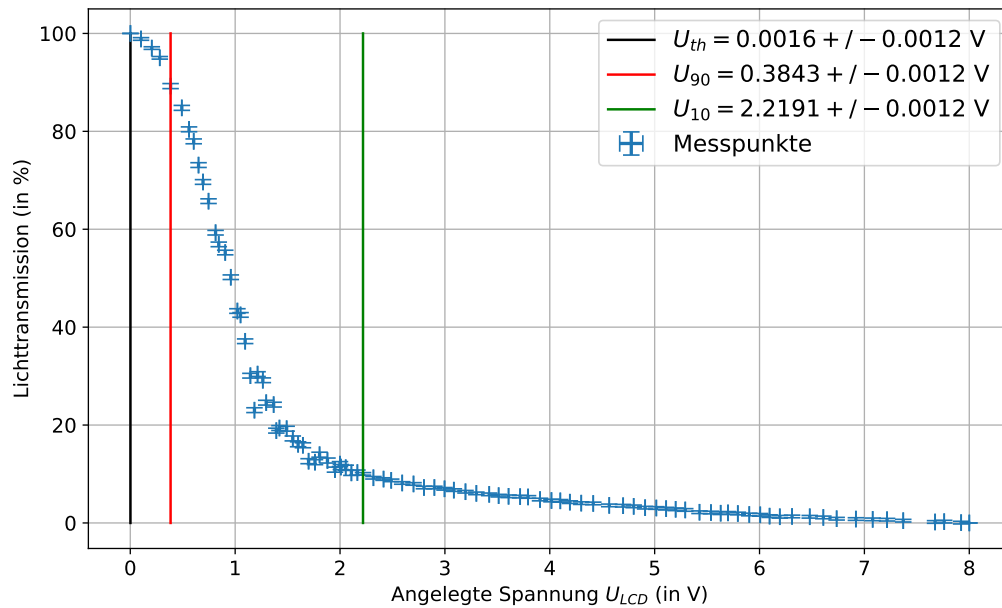


Abbildung 5: Kennlinie des selbst gebauten LC-Displays. Die schwarze Senkrechte liegt bei der Schwellspannung, welche mindestens am Display anliegen muss, um einen Unterschied in der Transmissivität messen zu können. Die rote (grüne) dagegen liegt bei der Spannung, bei der eine Transmission von 90% (10%) durch das Display gemessen wurde.

Aus den Kennlinien lassen sich die Kenngrößen aus Tabelle 2 bestimmen.

Tabelle 2: Kenngrößen des selbst gebauten und industriell gefertigten Displays.

	industriell	selbst gebaut
$\Delta U = U_{10} - U_{90}$	$(2,0009 \pm 0,0016)$ V	$(1,8348 \pm 0,0016)$ V
U_{th}	$(3,2110 \pm 0,0012)$ V	$(0,0016 \pm 0,0012)$ V

4.1.3 Diskussion

Zunächst einmal muss angemerkt werden, dass der hier bestimmte Wert für $\Delta U = U_{10} - U_{90}$ zwar erlaubt zu klassifizieren, ob das Display besser dazu geeignet ist, technisch einfach viele Helligkeitsstufen darzustellen oder aber mit geringer Spannungsdifferenz eine kontrastreiche Hell-Dunkel-Anzeige zu realisieren. Ob das Display tatsächlich gut für eine der beiden Varianten geeignet ist, hängt aber auch davon ab, wie hoch die Differenz der nichtnormierten Transmissivität bei U_{max} und U_{min} ist, da dies den tatsächlichen Kontrast beschreibt, also wie gut das durchsichtig geschaltete Display vom undurchsichtigen zu unterscheiden ist.

Wenn man zunächst nur die erste Überlegung anwendet, stellt man fest, dass das industrielle Display eine größere Spannungsdifferenz ($(2,0009 \pm 0,0016) \text{ V}$) zum Schalten benötigt, also besser für ein Display mit vielen verschiedenen Helligkeitsstufen geeignet ist, als das selbst gebaute, während dieses nur eine geringe Spannungsdifferenz ($(1,8348 \pm 0,0016) \text{ V}$) benötigt und somit z.B. für Taschenrechner, deren Batterien eine geringe Spannung liefern, geeignet ist. Letztere Einschätzung verstärkt sich dadurch, dass das industrielle bereits eine deutlich höhere Schwellspannung (vgl. Tabelle 2) benötigt, um überhaupt in den schaltbaren Bereich zu kommen. Wenn man allerdings die nichtnormierte Spannung an der Diode als Rückschluss auf die Intensität und diese als Rückschluss auf die nichtnormierte Transmissivität betrachtet (vgl. Tabelle 1), stellt man fest, dass die industrielle Anzeige, wenn sie auf lichtdurchlässig geschaltet ist, deutlich mehr Licht durchlässt und im undurchlässigen Fall deutlich weniger passieren lässt als die selbst gebaute. Dies bedeutet, dass, wenn man die nötige Spannung aufbringen kann, auch für eine Hell-Dunkel-Anzeige die industrielle Anzeige für ein einfaches Ablesen deutlich besser geeignet ist. Die geringe Schwellspannung hat zusätzlich den Nachteil, dass Spannungsschwankungen im durchlässigen Modus die Helligkeit des Displays ändern können.

Die geringere Transmissivität der selbst gebauten im durchlässigen Fall kann darin begründet sein, dass die selbst gebaute Anzeige stärker verunreinigt ist, ein anderer Flüssigkristall verwendet wurde oder das elektrische Feld im Innern des Displays aufgrund von Widerstandsverlusten geringer ist. Die höhere Transmissivität der selbst gebauten im undurchlässigen Fall kann auf eine höhere Schichtdicke des Flüssigkristalls oder eine bessere Ausrichtung der Moleküle an den Glasplatten im industriellen Display zurückgeführt werden. Außerdem ist zu erwarten, dass die Polfilterfolie nicht exakt im 0° -Winkel zu den Rillen in der Glasplatte aufgeklebt wurde, welche zueinander aufgrund des naturgemäß ungenauen Reibvorgangs wiederum nicht exakt parallel sind und somit auch nicht senkrecht zu denen auf der anderen Platte sind.

Dass es sich um einen anderen Flüssigkristall handelt kann dadurch bestätigt werden, dass sich die Schwellspannungen so stark unterscheiden, da die Schwellspannung mit der dielektrischen Anisotropie sinkt, welche davon abhängt, um welchen Flüssigkristall es sich handelt.

4.2 Bestimmung der kritischen Temperatur eines Flüssigkristalls

4.2.1 Unsicherheiten

Die Temperatur des Flüssigkristalls wird mit einem Thermometer mit einer Nachkommastelle gemessen, wodurch sich eine Unsicherheit von $u(T) = 0,03^\circ\text{C}$ ergibt. Die Unsicherheit des Abstands der aufgespalteten Strahlen des Lasers wird mit $u(d) = 1,7 \text{ mm}$ abgeschätzt. Diese setzt sich aus der Aufweitung des Laserstrahls und der instabilen Halterung des Laserpointers zusammen.

4.2.2 Beobachtung und Datenanalyse

Beim Steigern der Temperatur des Flüssigkristalls zeigt sich zunächst kaum eine Änderung in der Aufspaltung des Laserstrahls. Erst beim Überschreiten einer Grenztemperatur ändert sich die milchige Farbe des Kristalls zu der einer klaren Flüssigkeit. Zeitgleich verschwinden die zwei Strahlen und es findet sich nur noch ein Strahl zwischen den Positionen der ursprünglichen Strahlen. Nur ein Messpunkt lässt sich bei deutlich verringertem, aber noch vorhandenem Abstand finden.

Der gemessene Abstand der Laserstrahlen ist in Abb. 6 abhängig von der Temperatur dargestellt. Die kritische Temperatur T_C liegt demnach bei $(36,0 \pm 0,6)^\circ\text{C}$.

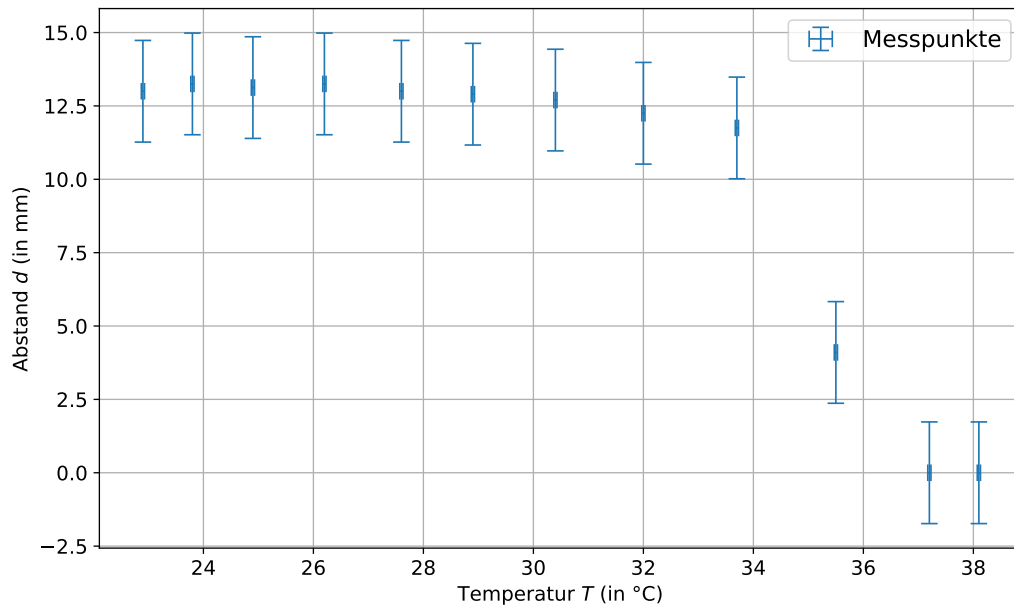


Abbildung 6: Temperaturabhängigkeit der Aufspaltung des den Flüssigkristall durchlaufenden Strahls.

4.2.3 Diskussion

Zu Abb. 6 lässt sich sagen, dass der Sprung von der nematischen Phase in die isotrope deutlich weniger abrupt vonstatten geht, als zu erwarten war. Diese Erwartung geht darauf zurück, dass es für den Kristall am energetisch günstigsten ist, erst dann die Orientierungsfernordnung zu verlieren, wenn die kritische Temperatur überschritten ist und davor bei homogener Temperatur zwar steigende, aber geringe Abweichungen von der Orientierungsfernordnung stattfinden (vgl. Abb. 2). Aufgrund der Art und Weise, wie die Peltierelemente positioniert sind, kann jedoch angenommen werden, dass die Temperatur im Innern des Flüssigkristalls nicht homogen ist und somit Teile des Kristalls bereits die Orientierungsfernordnung verloren haben, während andere sie noch haben.

Dies erklärt den Messpunkt in Abb. 6 bei etwa $T = 35,5^\circ\text{C}$, da hier offenbar der Laser durch einen Teil Flüssigkristall mit und einen ohne Orientierungsfernordnung strahlt und somit die Aufspaltung geringer ist, als wenn er vollständig durch Flüssigkristall in nematischer Phase strahlt.

Dass der Kristall bei der gleichen Temperatur klar wird, bei der die Doppelbrechung verschwindet, entspricht der Erwartung, da die Doppelbrechung für die milchige Farbe verantwortlich ist.

Aus dieser Feststellung lässt sich folgern, dass diese Methode mit dem verwendeten Aufbau nur geeignet ist, um eine grobe Bestimmung der kritischen Temperatur durchzuführen. Die so bestimmte Temperatur beträgt $(36,0 \pm 0,6)^\circ\text{C}$ und beinhaltet im doppelten Unsicherheitsintervall den Literaturwert von 4'-Pentyl[1,1'-biphenyl]-4-carbonitril (5CB) aus [3] von 35°C .

Ein längeres Warten vor der Aufnahme des Messwertes würde nur bedingt hiergegen helfen, da durch die Positionierung der Peltierelemente immer noch ein räumliches Temperaturgefälle zwischen Peltierelement und Umgebungsluft bestehen würde. Dies könnte nur durch ein gleichmäßiges Erhitzen der gesamten Umgebung des Versuchsaufbaus umgangen werden.

5 Schlussfolgerung

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass eine Flüssigkristallanzeige hergestellt werden konnte, ihre elektrooptische Kennlinie aufgenommen werden konnte sowie die kritische Temperatur des Übergangs zwischen nematischer und isotroper Phase eines anderen Flüssigkristalls bestimmt werden konnte. Beim Vergleich der selbst gebauten Flüssigkristallanzeige mit einer industriellen wurde festgestellt, dass die selbst gebaute in ihren Eigenschaften für die Anwendung schlechter geeignet ist als die industrielle. Lediglich in Bezug auf die Geringe der Schwellspannung ist die selbst gebaute im Vorteil. Die Bestimmung der kritischen Temperatur eines Flüssigkristalls durch Ausnutzung der Doppelbrechung war möglich, aber aufgrund der Art der Versuchsdurchführung und des Versuchsaufbaus nur innerhalb großer Unsicherheiten. Für eine genauere Untersuchung wäre ein langsames Erhöhen der Temperatur in geringeren Schritten und die Möglichkeit eines gleichmäßigeren Erhitzens des Flüssigkristalls notwendig.

Literatur

- [1] Universität Münster. *Experimentelle Übungen für Fortgeschrittene; Aufgaben im Institut für Materialphysik; Orientierungsordnung in Flüssigkristallschichten*. 19. Apr. 2017. URL: https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/pluginfile.php/1624127/mod_folder/content/0/MP5/MP5_Anleitung-de.pdf?forcedownload=1 (besucht am 06.01.2019).
- [2] Institut für Materialphysik. *Aufgaben im Institut für Materialphysik, Aufgabe 7, Flüssigkristalle*. Münster, 2004.

- [3] Yan-Yeung Luk u. a. „Non-toxic thermotropic liquid crystals for use with mammalian cells“. In: *Liquid Crystals* 31.5 (Mai 2004), S. 611–621. DOI: 10.1080/02678290410001666020. URL: <https://doi.org/10.1080/02678290410001666020>.