

Angelina Hauser 4cN
Maturitätsarbeit 23/24

BETREUT VON
Ali Parsa



Kantonsschule Stadelhofen

Der Bau einer LCD-Zelle

Wie funktioniert mein Fernseher?

1	Inhalt	
1	INHALT.....	2
1	VORWORT	4
1.1	MOTIVATION	4
2	ABSTRACT.....	5
3	EINLEITUNG	6
3.1	Geschichte	6
3.2	Leitfragen.....	7
4	THEORETISCHER TEIL.....	8
4.1	Einführung in eine spezielle Phase der Materie	8
4.1.1	Aggregatzustände und Phasendiagramm	8
4.1.2	Flüssigkeiten vs. Kristalle	9
4.1.3	Orientierung und positionelle Ordnung	12
4.1.4	Ordnungsparameter S	13
4.2	Arten von Flüssigkristallen.....	14
4.2.1	Kalamatische Flüssigkristalle	15
4.2.2	Diskotische Flüssigkristalle	15
4.2.3	Lyotrope Flüssigkristalle	17
4.2.4	Polymere.....	18
4.3	Die verschiedenen Phasen von Flüssigkristallen	18
4.3.1	Nematische Phase.....	19
4.3.2	Smektische Phasen	20
4.3.3	Smektisch A	20
4.3.4	Smektisch C.....	20
4.3.5	Smektisch hexatische Phase	20
4.3.6	Kristalline Mesophasen	21
4.3.7	Cholesterische Phase	21
4.4	Optische Eigenschaften	22
4.4.1	Die elektromagnetische Welle.....	23
4.4.2	Allgemeine Funktionsgleichung einer elektromagnetischen Welle	25
4.4.3	Linear polarisierte Welle.....	25
4.4.4	Zirkular polarisierte Wellen	26
4.4.5	Elliptische Polarisation.....	27
4.4.6	Brechungsindex (Brechzahl)	28
4.4.7	Doppelbrechung	29
5	PRAKTISCHER TEIL.....	31
5.1	Aufbau einer LCD-Zelle	31
5.2	Funktionsweise einer LCD-Zelle.....	32
5.3	LED-Display	33
6	VORGEHEN	35

6.1	Material und Methodik	35
7	ERGEBNISSE	40
7.1	Versuch 1	40
7.2	Versuch 2	41
7.3	Versuch 3	42
7.4	Versuch 4	44
8	AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	45
8.1	Reaktionszeiten der LCD-Zellen	45
8.1.1	Versuch 1	45
8.1.2	Versuch 2	46
8.1.3	Versuch 3	47
8.1.4	Versuch 4	49
8.1.5	Vergleich	49
8.2	Diskussion.....	50
8.2.1	Beantwortung der Leitfragen	50
8.2.2	Methodenanalyse.....	51
8.2.3	Ausblick in die Zukunft	52
9	SCHLUSSWORT.....	53
9.1	Persönlicher Kommentar.....	53
9.2	Danksagung	53
10	GLOSSAR.....	54
11	EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	56
12	LITERATURVERZEICHNIS	57
13	ABBILDUNGSVERZEICHNIS:.....	62
14	ANHANG.....	64
14.1	Unverwendete Bilder.....	64

1 Vorwort

1.1 Motivation

Erinnern Sie sich noch an die kindliche Neugier, als Sie vor dem Fernseher saßen und sich fragten, wie dieses magische Gerät funktioniert? Diese Frage begleitet mich bis heute und trieb mich dazu an, im Rahmen meiner Maturaarbeit das Geheimnis des „Kindheitsfernsehers“ zu entschlüsseln.

Die Entscheidung mich mit diesem Thema auseinanderzusetzen, basiert unter anderem auf meinem persönlichen Interesse im Fachgebiet Chemie. Meine Neugierde wurde jedoch damals im Physikunterricht geweckt, als ich mehr über den Aufbau des LED-Displays erfuhr. Besonders faszinierte mich die Erkenntnis, dass dieser aus LCD-Zellen besteht, welche eine Schicht Flüssigkristalle beinhalten, die mittels eines elektrischen Feldes die Fähigkeit besitzen, die Lichtdurchlässigkeit zu steuern.

Durch meine Maturaarbeit strebe ich nicht nur an, die Funktionsweise dieser Technologie, die mir einst als Kind den Atem raubte zu verstehen, sondern mich auch mit der speziellen Phase der Materie, den sogenannten Flüssigkristallen, tief gehend auseinander zu setzen.

2 Abstract

Die meisten von uns sitzen jeden Tag vor dem Fernseher, ohne auch nur einen blassen Schimmer zu haben, was im Inneren des Bildschirms vor sich geht. Während wir uns darüber im Klaren sind, dass ein Display nicht einfach aus einem Megapixel besteht, sondern aus einer Vielzahl von ihnen, bleibt die genaue Funktionsweise der LCD-Zellen und deren Nutzung von Flüssigkristallen, die Lichtdurchlässigkeit steuern, für viele ein wissenschaftliches Rätsel.

Das Ziel dieser Maturaarbeit war die Auseinandersetzung mit dieser Technologie, um ein tiefgehendes Verständnis für ihre Funktionsweise zu erwerben. Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile.

Der *theoretische Teil* umfasst eine Analyse der speziellen Phase der Materie. Dabei werden nicht nur die verschiedenen Arten von Flüssigkristallen, sondern auch ihre Phasen und optischen Eigenschaften eingehend und detailliert untersucht.

Im *praktischen Teil* der Arbeit wird zuerst der Aufbau einer LCD-Zelle und deren Funktionsweise beschrieben. Anschliessend wird vorgestellt, wie sich die 6'220'800 LCD-Zellen der Subpixel zu einem Full-HD-Display zusammenfügen. Der Kern dieses Teils widmet sich jedoch dem selbständigen Bau einer LCD-Zelle, die durch eine Batterie betrieben wird.

3 Einleitung

3.1 Geschichte

Heute leben wir in einer Welt, in der die Digitalisierung allgegenwärtig ist. Elektronische Geräte sind aus Schulen, Arbeitsplätzen und unseren eigenen vier Wänden nicht mehr wegzudenken. Doch es ist noch nicht lange her, dass das Leben ohne digitale Abhängigkeit die Norm war. Im 19. Jahrhundert waren zwar bereits gewisse technische Voraussetzungen für die Bildübertragung durch die gelochte Scheibe von Paul Nipkow gegeben. Das Bild wurde bei der Drehung zerlegt und anschliessend wieder zusammengefügt. Hierbei handelte es sich aber um eine rein mechanische Bildabtastung, und auch durch nachfolgende Erfindungen konnte diese vorerst nicht durch ein elektrisches Verfahren ersetzt werden. Erst vor weniger als hundert Jahren kam es zu einer bahnbrechenden Erfindung, welche auf der Berliner Funkausstellung im Jahr 1931 von Manfred von Ardenne präsentiert wurde.¹ Es handelte sich um das erste elektronische Fernsehgerät, welches einen Wendepunkt in der Geschichte des Fernsehgerätes markierte. Seitdem hat sich die Technologie exponentiell weiterentwickelt. Es dauerte nicht lange, bis der Röhrenfernseher vom modernen Flachbildschirm-Fernseher abgelöst wurde.² Während unsere Grosseltern noch mit dem klassischen Schwarz-Weiss-Fernsehen gross geworden sind, haben wir heute ein beinahe farbechtes Bild mit einer so hohen Auflösung, dass man es schon fast als realitätsgetreu beschreiben könnte.

Aber wie kann denn überhaupt ein Bild auf der Anzeige erscheinen?

Die Antwort führt uns zu dem light emitting diode Display (LED). Dieser besteht wiederum aus vielen Pixeln, die beliebige Farben anzeigen können und ermöglichen ein farbiges Bild zu erzeugen. Dabei enthält jeder dieser Pixel drei Subpixel mit einer eigenen LCD-Zelle. Diese sind mit einem Farbfilter der Grundfarben rot, grün und blau versehen.³

¹ (NDR, 2023).

² (TV, 2023).

³ (LEIFlphysik, Funktion von LCD-Displays, 2023).

3.2 Leitfragen

Es stellt sich jedoch die zentrale Frage, was eine LCD-Zelle überhaupt ist und wie sie aufgebaut ist, was Flüssigkristalle sind und wofür deren Eigenschaften in diesem Kontext gebraucht werden können? Im theoretischen Teil werden die Zusammenhänge zwischen den anisotropen Flüssigkeiten und deren Einfluss auf die optischen Eigenschaften der LCD-Zelle erschlossen. Zudem sollen verschiedene Arten von Flüssigkristallen und die Unterschiede der einzelnen Mesophasen analysiert werden. Basierend auf den Erkenntnissen und dem erworbenen Wissen soll im praktischen Teil mit Hilfe experimenteller Versuche untersucht werden, inwiefern der Bau einer funktionsfähigen und batteriebetriebenen LCD-Zelle realisierbar ist. Ziel meiner Maturaarbeit ist es, Antworten auf die vorherig aufgelisteten Fragen zu finden.

4 Theoretischer Teil

4.1 Einführung in eine spezielle Phase der Materie

4.1.1 Aggregatzustände und Phasendiagramm

Grundsätzlich gibt es drei physikalische Zustände der Stoffe, welche sowohl von Temperatur als auch Druck abhängig sind. Man unterscheidet zwischen fest, flüssig und gasförmig. In der Fachsprache sind sie als Aggregatzustände bekannt. Erhitzt man beispielsweise Wasser auf 100 Grad Celsius, beginnt es zu verdampfen und geht somit in den gasförmigen Zustand über. Es findet also ein sogenannter Phasenübergang statt. Gefriert man das Wasser hingegen, entsteht Eis, ein Festkörper. Diese Zustandsänderungen können in einem typischen Phasendiagramm festgehalten werden:

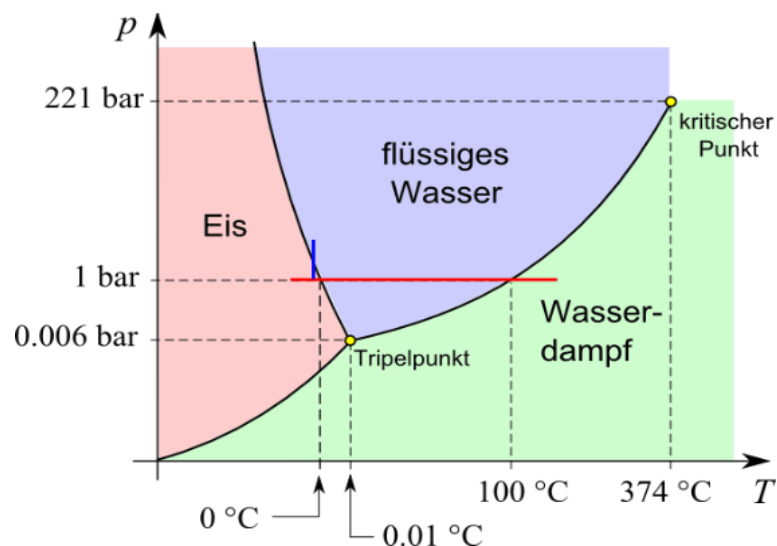


Abbildung 1: Phasendiagramm von Wasser
(Embacher, 2013/2014)

Abbildung 1 zeigt das typische Zustandsschaubild von Wasser. Auf der X-Achse wird die Temperatur von rechts nach links in Grad Celsius angegeben und auf der Y-Achse der Druck in der Einheit bar, welcher von unten nach oben steigt. Einer der beiden besonderen Punkte ist der sogenannte Tripelpunkt, bei dem sich das Wasser gleichzeitig in allen drei Phasen aufhalten kann. Beim zweiten handelt es sich um den kritischen Punkt oben rechts. Sobald dieser erreicht wird, ist eine Unterscheidung zwischen gasförmig und flüssig unmöglich. Dies lässt sich damit begründen, dass sich ihre Dichten laufend annähern. Die rote Linie im

Diagramm bei 1 bar (Normaldruck) ist Indikator, wie sich Wasser unter normalen Bedingungen aufhält.⁴ Deshalb ist es bei Temperaturen unter 0°C in fester Form anzutreffen und bis zu 100°C verhält es sich flüssig, bevor es dann in den gasförmigen Zustand übergeht. Während den Phasenübergängen werden zwischen-molekulare Kräfte überwunden, auch unter dem Kürzel ZMK bekannt. Damit diese inter-molekularen Kräfte im Fall von Wasser *Van der Waals Kräfte*, *Dipol-Dipol Kräfte* sowie *Wasserstoffbrücken* auch überwunden werden können, braucht man Energie zum Beispiel in Form von Wärme. Die kalkulierte Energie, die man dafür benötigt, ist aber dennoch wesentlich geringer als diejenige, die gebraucht wird, um eine kovalente oder eine ionische Bindung zu spalten.⁵

4.1.2 Flüssigkeiten vs. Kristalle

Im Alltag nehmen wir Flüssigkeiten als Stoff wahr, den man weder mit den Händen halten noch formen kann. Dies hat hauptsächlich mit dessen Konsistenz zu tun. Betrachtet man Flüssigkeiten hingegen auf der Teilchen Ebene, lassen sich diese Phänomene begründen. Zwischen den einzelnen Molekülen herrschen hauptsächlich intermolekulare Kräfte, welche es ermöglichen, die Moleküle dicht aneinander zu halten, aber dennoch nicht stark genug sind, dass sie die Teilchen davon abhalten sich zu bewegen. Sie verfügen somit über keinerlei Ordnung, und die Molekülachsen taumeln wild hin und her. Dies ist auch der Grund, weshalb Flüssigkeiten die Form des Behälters annehmen, in dem sie sich befinden. Sie verfügen zudem über ein festes Volumen und sind kaum komprimierbar im Gegensatz zu Gasen aufgrund ihrer höheren Dichte.⁶ Um diese spezifischen Eigenschaften zu visualisieren, kann man die Flüssigkeiten im Teilchenmodell betrachten:

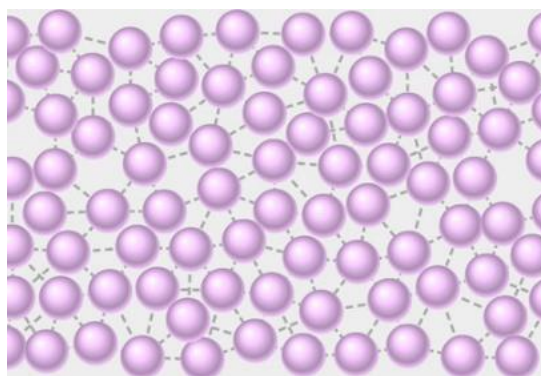


Abbildung 2: Flüssigkeit im Teilchenmodell
(Boyd, 2021)

⁴ (Embacher, 2013/2014).

⁵ (Brown, et al., 2018)S.489-492.

⁶ (Brown, et al., 2018)S.463-467.

Im Modell werden die Moleküle einfachheitshalber in Form von Kreisen dargestellt und die ZMK zwischen den einzelnen Teilchen mit gestrichelten Linien. Die bewusste Wahl, keine durchgezogene Linie zu wählen, liegt daran, dass in der Chemie Bindungen so dargestellt werden.⁷

Zieht man nun einen direkten Vergleich zu einem Kristall, sind elementare Unterschiede festzustellen. Hierbei ist es wichtig, eine Differenzierung zu einem amorphen Festkörper vorzunehmen. Ein amorpher Feststoff ähnelt in seinem Aufbau einer Flüssigkeit aufgrund seiner Unordnung. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass die Teilchen in ihrer Bewegungsfreiheit deutlich eingeschränkter sind.⁸

Kristalline Festkörper hingegen haben eine klare Ordnung, eine Art repetitives Muster. Diese sich immer wiederholende Einheit wird auch Elementarzelle genannt. Sie definiert den späteren Aufbau des Kristalls, in dem sie einen dreidimensionalen Raum knüpft. Wie die Zellen sich im Muster anordnen, wird durch das sogenannte Kristallgitter definiert. Es ist der Grundbaustein, um die Elementarzellen zu füllen. Zum Beispiel mit C-Atomen, wie es bei einem Diamanten der Fall ist, brauchen man das Gitter als Anhaltspunkt. Einfachheitshalber wird das Gitter vorerst im zweidimensionalen Bereich betrachtet.⁹

Das *Zweidimensionale* ist wie folgt aufgebaut: Es hat zwei Richtungsvektoren a und b , auch Gittervektoren genannt, welche sich an einem Gitterpunkt festlegen und damit ein Parallelogramm bilden und somit den Bereich einer Elementarzelle definieren (Abbildung 3).¹⁰

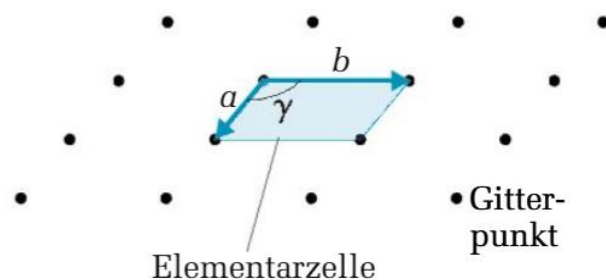


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Elementarzelle
(Brown, et al., 2018) S.505

⁷ (Boyd, 2021).

⁸ (Brown, et al., 2018)S.504-505.

⁹ (Brown, et al., 2018)S.505.

¹⁰ (Brown, et al., 2018)S.505.

Im zweidimensionalen Bereich lassen sie sich fünf verschiedene Gittertypen zuweisen.

Beim *schiefwinkligen* Gitter ist zwischen den Gittervektoren a und b ein beliebig grosser Winkel γ , wodurch ein arbiträres Parallelogramm entsteht. Beim *quadratischen* und *rechteckigen* Gitter stehen die Vektoren immer in einem 90° Winkel zueinander. Der einzige Unterschied zwischen den beiden besteht in den Längen von a und b , die beim quadratischen Gitter zwingend identisch sind, während sie sich beim rechteckigen unterscheiden. Beim *hexagonalen* Gitter ist es sind die Vektoren von gleicher Länge und stehen in einem Winkel von 120° zueinander. Das *rhombische* Gitter bildet einen Spezialfall, da es zwei Möglichkeiten hat, eine Elementarzelle zu bilden. Entweder in Form einer Raute oder als Rechteck mit einem zusätzlichen zentrierten Gitterpunkt, daher stammt auch dessen Zweitname *zentriert-rechteckiges* Gitter.¹¹

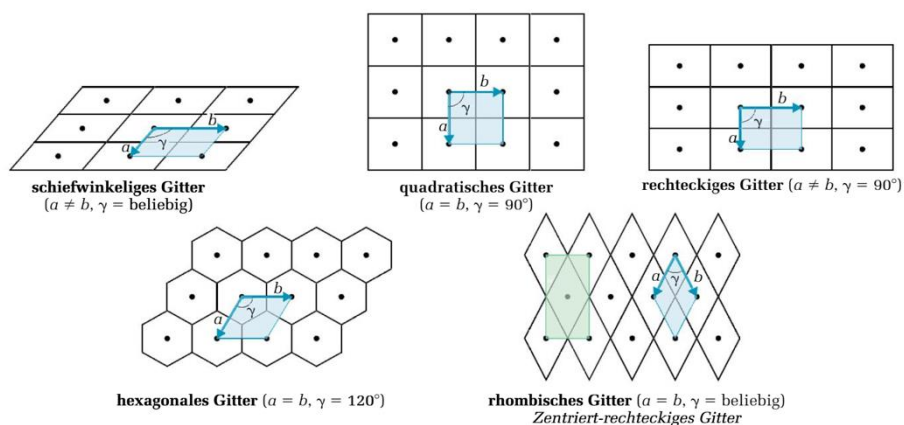


Abbildung 4: Zweidimensionale Gitterformen der Kristalle
(Brown, et al., 2018) S.506

Um zu verstehen, wie aus dem zweidimensionalen Gitter ein kristalliner Festkörper entsteht, muss eine dritte Dimension eingeführt werden. Neu gibt es neben den Gittervektoren a und b den Vektor c . Je nachdem in welchem Winkel sie zueinanderstehen, entstehen unterschiedliche Parallelepipede. Wenn die Gitterpunkte nur an den Ecken angelegt sind, spricht man von einem *primitiven kubischen* Gitter. Wenn zusätzlich ein Gitterpunkt in der Mitte der Elementarzelle vorliegt, spricht man von einem *innenzentrierten kubischen* Gitter. Zu guter Letzt existiert noch das *flächenzentrierte kubische* Gitter und wie es der Name schon sagt, besitzt jede der sechs Flächen im Zentrum einen Gitterpunkt. Anschliessend müssen die

¹¹ (Brown, et al., 2018)S.505-507.

Gitter noch mit Gruppen von Atomen, den sogenannten Motiven, gefüllt werden, bevor die repetitive Kristallstruktur entstehen kann.¹²

4.1.3 Orientierung und positionelle Ordnung

Was Flüssigkristalle nun so besonders macht ist, dass sie zugleich Eigenschaften von Kristallen sowie von Flüssigkeiten besitzen. Während sich die Moleküle in Flüssigkeiten frei bewegen und über keinerlei Ordnung verfügen, haben Kristalle sowohl eine positionelle wie auch eine orientierende Ausrichtung. Der Grund dafür besteht lediglich darin, dass die Atome im Kristallgitter einen festen Platz einnehmen müssen, wo durch die Molekülachsen sich automatisch in eine Richtung ausrichten. Die Moleküle in Flüssigkristallen taumeln ähnlich wie bei Flüssigkeiten mit ihren Molekülachsen wild umher. Der Unterschied besteht darin, dass sie über ein gewisses Mass an orientierender manchmal auch positioneller Ordnung verfügen. Diese Ordnung ist im Vergleich zu Kristallen jedoch nur gering. Man spricht auch von Tendenzen einer Ausrichtung oder eines Aufenthaltsorts. Dass der grösste Teil der Ordnung beim Phasenübergang eines Kristalls zu einem Flüssigkristall verloren geht, wird anhand des Wertes der latenten Wärme ersichtlich. Beim Übergang vom Kristall in eine Flüssigkeit liegt der Wert bei 250 J/g, hingegen bei der Umwandlung eines Flüssigkristalls in eine Flüssigkeit nur bei etwa 5 J/g. Dennoch verfügen sie über mechanische sowie auch elektromagnetische Eigenschaften, welche in der Anwendung zum Tragen kommen.¹³

In einer einfachen Flüssigkristallphase zeigen die Moleküle eine bemerkenswerte Neigung, sich entlang einer bevorzugten Richtung auszurichten, die als Direktor bezeichnet wird. Dieser Direktor wird durch einen Einheitsvektor (n) repräsentiert. Eine Orientierungsverteilungsfunktion zeigt, wie sich die Moleküle im Verhältnis zum Direktor orientieren. Diese Funktion gibt an, wie viele molekulare Achsen einen bestimmten Winkel (θ) in Bezug auf den Direktor einnehmen. Es gibt zwei Möglichkeiten die Funktion zu beschreiben: durch das Aufnehmen von Molekülen zu einem bestimmten Zeitpunkt oder durch das Nachverfolgen der Ausrichtung einzelner Moleküle über einen Zeitraum.¹⁴

¹² (Brown, et al., 2018)S.505-507.

¹³ (Hird Michael, 1997)S.1.

¹⁴ (Hird Michael, 1997)S.2.

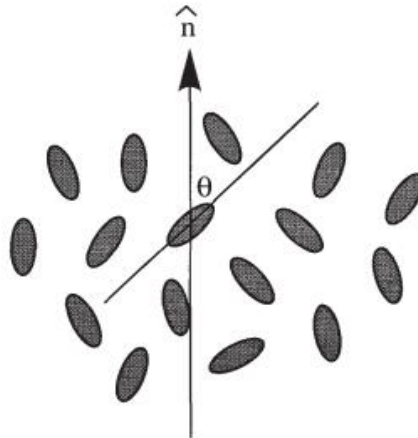


Abbildung 5: Molekulare Anordnung in einem nematischen Flüssigkristall
(Hird Michael, 1997) S.2

4.1.4 Ordnungsparameter S

Der Direktor kann als eine Art Mittelwert aller Ausrichtungen der Moleküle in einem Aggregat betrachtet werden. Es gibt unzählige Moleküle, die von seinem Wert abweichen, sei dies nun stärker oder schwächer. Um den Grad der Orientierungsordnung in einer Flüssigkristallphase zu bestimmen, gibt es demnach einen sogenannten Ordnungsparameter S .¹⁵ Dieser lässt sich unter anderem durch das zweite Legendre-Polynom ($\cos^2\theta$) berechnen. Hierbei handelt es sich um eine spezielle mathematische Funktion, die auch in der Quantenmechanik von Bedeutung ist. Dort wird sie verwendet, um Schrödingers Gleichung zu lösen.¹⁶ Es handelt sich um ein Polynom in der trigonometrischen Funktion Kosinus des Winkels (θ).¹⁷ Damit man verstehen kann, weshalb genau diese Funktion für den Ordnungsparameter von Bedeutung ist, wird der Cos im Einheitskreis betrachtet. Es lässt sich feststellen, dass je kleiner die Winkel sind, desto grösser sind die Kosinus Werte. Wenn der Winkel (θ) exakt 0° entspricht, ist der Kosinus genau eins.¹⁸

$$S = \frac{\int_0^\pi f(\theta) \left(\frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right) \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi_0}{\int_0^\pi f(\theta) \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi} = \frac{\int_{-1}^1 \left(\frac{3}{2} x^2 - \frac{1}{2} \right) dx}{\int_{-1}^1 dx} = 0,$$

Abbildung 6: Ordnungsparameter S (Hird Michael, 1997) S.2

¹⁵ (Schmidt, 1999).

¹⁶ (Fendt, 2019).

¹⁷ (LEXIKON DER PHYSIK, Legendre-Polynome, 1998).

¹⁸ (Noack, 2009).

Dies lässt sich nun auf die Orientierungsordnung in einem Aggregat übertragen. Wenn alle Moleküle perfekt ausgerichtet sind, ist der Winkel (θ) für alle Moleküle gleich Null, da deren Ausrichtung mit dem Direktor übereinstimmt. Bei $S=1$ würde ein perfekt ausgerichtetes System entstehen. Bei einer willkürlichen Ausrichtung hingegen ist der Winkel (θ) für alle Moleküle unterschiedlich, da sie keinerlei Übereinstimmung mit der Ausrichtung des Direktors aufweisen. Dies hat zur Folge, dass $S=0$ ist. Im Normalfall hingegen verfügen Flüssigkristalle über ein gewisses Mass an Ordnung, weshalb die Werte von S meist in einem Bereich von null bis eins liegen.¹⁹

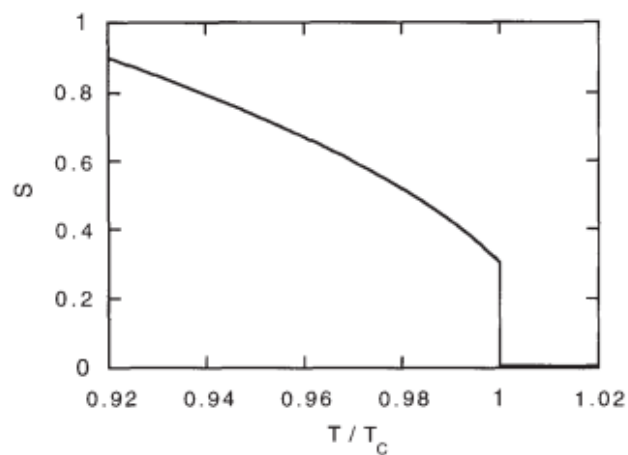


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des Parameters S , wobei T_c der Temperatur des Phasenübergangs des Flüssigkristalls zur flüssigen Phase entspricht.
(Hird Michael, 1997) S.3

Da S auch temperaturabhängig ist, nimmt der Parameter eines Flüssigkristalls mit steigendem Grad Celsius ab. Dies sieht man auch in der Abbildung 6. Im Normalfall weist S Werte zwischen 0.3 und 0.8 auf. Jedoch ab einer gewissen Temperatur (dargestellt als Knick in der Grafik) kommt es zum Verlust jeglicher Ordnung, dementsprechend ist $S=0$.²⁰

4.2 Arten von Flüssigkristallen

Es gibt verschiedene Moleküle, die flüssigkristalline Phasen bilden. Alle haben anisotrope Eigenschaften. Anisotropie bedeutet, dass die Moleküle in mindestens einer Dimension signifikante Unterschiede aufweisen. Dies kann erfolgen, weil eine Molekülachse erheblich

¹⁹ (Hird Michael, 1997)S.2-3.

²⁰ (Hird Michael, 1997)S.3.

länger ist als die beiden anderen Molekülachsen. Es kann auch eintreten, dass Teile des Moleküls verschieden stark löslich sind. Die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen spielen eine essenzielle Bedeutung für die Ausrichtung und gelegentlich auch in der positionellen Ordnung.²¹

4.2.1 Kalamatische Flüssigkristalle

Der für die LCD-Technologie relevanter Molekültyp ist das Stäbchenmolekül. Diese Flüssigkristalle werden in der Fachsprache als kalamatische Flüssigkristalle bezeichnet. Hierbei ist es wichtig, dass mindestens ein Teil des Moleküls steif ist, damit es seine Stäbchenform beibehalten kann.²² Diese ist wichtig für die Wechselwirkungen, welche wiederum die Ausrichtung fördert.²³

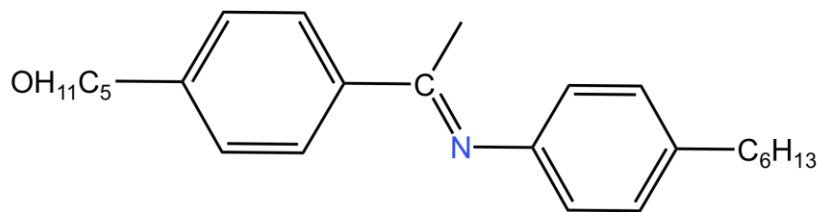


Abbildung 8: Typisches kalamatisches Flüssigkristallmolekül
(eigene Darstellung, 2023)

Ein typisches kalamatisches Flüssigkristall Molekül hat einen gewissen Grundaufbau. Es liegen mindestens zwei Benzolringe vor, welche durch eine starre Verknüpfungsgruppe (z.B. Imino-Gruppe) oder sogar direkt miteinander verbunden werden. An den beiden Enden liegen jeweils organische Reste, also Kohlenwasserstoffketten. Es können auch kleine Abweichungen entstehen, dennoch kann die Verbindung flüssigkristalline Phasen ausbilden. Beispielsweise kann eine Kohlenwasserstoffkette durch eine Estergruppe ersetzt werden.²⁴

4.2.2 Diskotische Flüssigkristalle

Neben den klassischen kalamatischen Flüssigkristallen gibt es auch die diskotischen Flüssigkristalle. Man kennt sie auch als scheibenförmige Moleküle, die sich durch ihr

²¹ (Hird Michael, 1997)S.5-6.

²² (Metallurgy, 2004-2023).

²³ (Hird Michael, 1997)S.6.

²⁴ (Hird Michael, 1997)S.6.

aromatisches Ringsystem im Kern auszeichnen.²⁵ Der Kern eines typischen scheibenförmigen Flüssigkristalls beruht normalerweise auf Benzol, Triphenylen oder Truxen, dessen chemischer Aufbau in der folgenden Tabelle zu finden ist. Diese aromatischen Verbindungen ermöglichen die Elektronenübertragung, dessen 6-8 Seitenketten aus kalamatisch ähnlichen Molekülen bestehen.²⁶

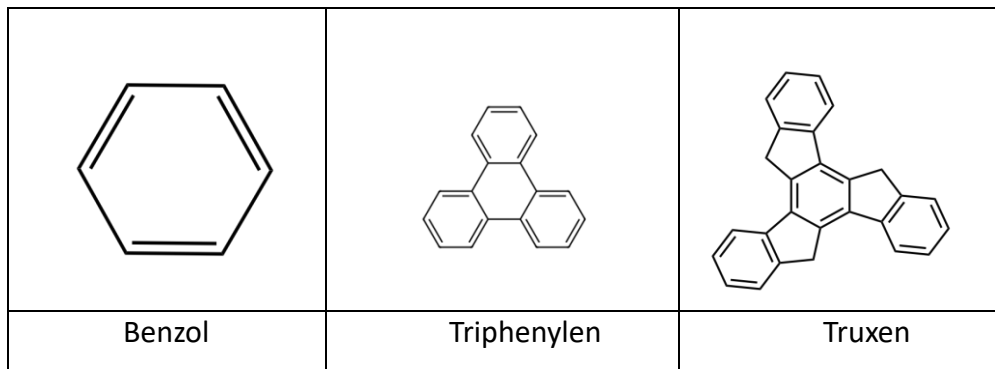


Abbildung 9: Molekülaufbau von Benzol, Triphenylen & Truxen
(eigene Darstellung, 2023)

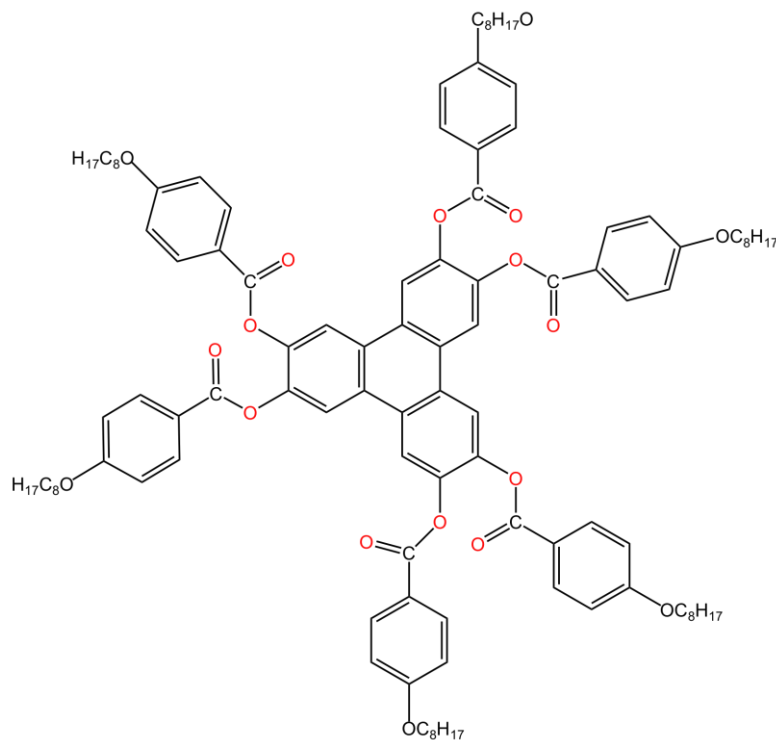


Abbildung 10: Diskotisches Flüssigkristallmolekül mit Triphenylen im Kern
(eigene Darstellung, 2023)

²⁵ (Limbach, 2018).

²⁶ (Hird Michael, 1997)S.7.

4.2.3 Lyotrope Flüssigkristalle

Kalamatische und diskotische Flüssigkristalle zählen zu thermotropen Flüssigkristallen, da sie nur in einem gewissen Temperaturbereich stabil sind. Im Gegensatz zu diesen beiden gibt es auch bestimmte Arten von Molekülen, welche nur unter speziellen Bedingungen flüssigkristalline Phasen bilden. Bekanntlich erst dann, wenn man sie zu einer Art Lösungsmittel gibt. Hier spielt also die Konzentration (c) der Lösung eine grössere Rolle als die Temperatur. Man nennt sie *lyotrope* Flüssigkristalle. Deren grundlegende Struktur umfasst eine Anordnung, bei der eine hydrophobe Gruppe an einem Ende des Moleküls und eine hydrophile Gruppe am gegenüberliegenden Ende platziert ist.²⁷ Die Moleküle sind amphiphil und besitzen somit die Fähigkeit, sich in polaren und unpolaren Lösungsmitteln aufzulösen.²⁸ Ein klassisches Beispiel aus dem Haushalt wäre Seife (Abbildung 9(a)) oder ein Phospholipid (Abbildung 9(b)), welches wir aus der Biologie kennen und in der Bildung von Zellmembranen eine wichtige Rolle spielt.²⁹

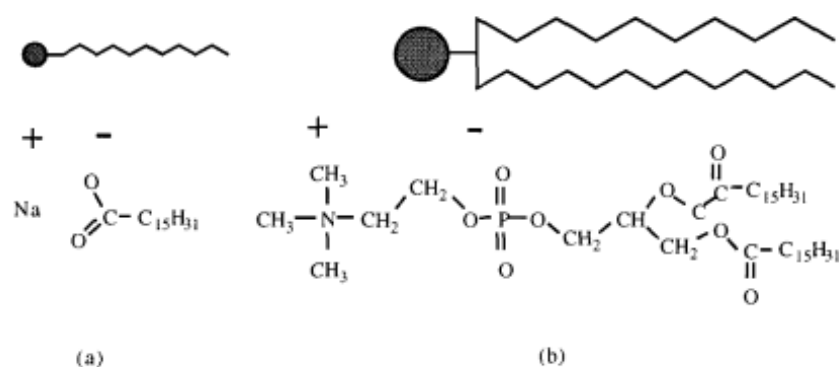


Abbildung 11: Lyotropische Flüssigkristalle: (a) Seife; (b) Phospholipid c
(Hird Michael, 1997) S.7

Wenn die lyotropen Flüssigkristalle nun in einem polaren Lösungsmittel gelöst werden, passiert folgendes: Die hydrophoben Schwänze des Moleküls gruppieren sich, so dass deren hydrophoben Köpfe direkt dem Lösungsmittel ausgesetzt sind. Die Struktur, die bei Seifenmolekülen entsteht, bezeichnet man als Mizelle, bei Phospholipiden hingegen, spricht man von einer Vesikel Struktur.

²⁷ (Hird Michael, 1997)S.7.

²⁸ (Chemie.de, Amphiphilie, 1997-2023).

²⁹ (Hird Michael, 1997)S.7.

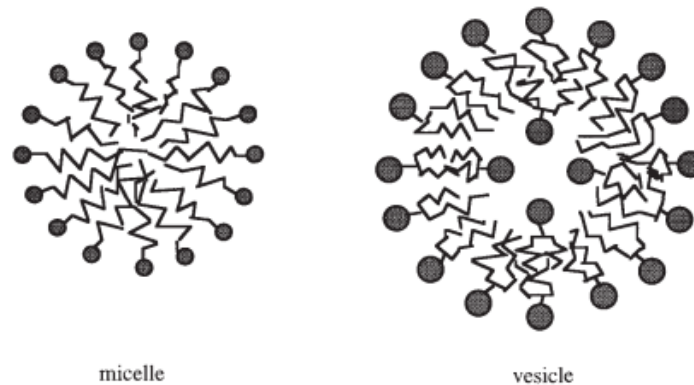


Abbildung 12: Mizelle; Vesikel
(Hird Michael, 1997) S.8

Mischt man sie mit einem unpolaren Lösungsmittel, kommen auch die Schwänze in Kontakt mit der Lösung, weshalb man auch von „reversed phases“ spricht.³⁰³¹

4.2.4 Polymere

Zu guter Letzt gibt es noch die Polymere, welche auch Eigenschaften von Flüssigkristallen aufweisen. Damit dies möglich ist, müssen die Seiten- oder Hauptketten der Polymere aus kalamatischen Flüssigkristallmolekülen bestehen.³² Man kennt sie auch unter dem Namen LCPs, welche sich aufgrund ihrer langen Ketten als äusserst robust gegen Hitze, UV und andere chemische Substanzen erweisen. Dies sowohl in der flüssigen wie auch in der festen Phase. In der Synthese können diese Eigenschaften beeinflusst werden. Je nachdem wie stabil das Polymer ausfallen soll, muss der Kristallin Grad erhöht werden.³³

4.3 Die verschiedenen Phasen von Flüssigkristallen

Es gibt verschiedene Phasen, in denen Flüssigkristalle vorkommen. Sie weisen alle eine Art Ordnung auf. Ob nur eine Orientierungsrichtung oder auch eine positionelle Ausrichtung vorliegt, hängt von der Phase ab. Das Verständnis dieser Phasen und ihren Eigenschaften ist fundamental, um Flüssigkristalle effektiv in verschiedenen Anwendungen einzusetzen und neue Technologien zu entwickeln. Man unterscheidet zwischen der einfachsten Phase der

³⁰ (Dahman, 2017)Kapitel 10.3.2.

³¹ (Hird Michael, 1997)S.7.

³² (RCT Reichelt Chemietechnik GmbH, unbekannt).

³³ (Henan Daken Chemical Co., 2022).

sogenannten nematischen Phase, der smektischen Phase, bei der noch raffiniertere Unterteilungen gemacht werden können. Sie lässt sich nämlich in smektisch A und C unterteilen. Zusätzlich gibt es doch eine smektisch hexatische und eine kristalline Mesophase. Wobei wir uns bei der kristallinen Mesophase bereits im Bereich einer dreidimensionalen Ordnung bewegen. Zu guter Letzt gibt es noch die cholesterische Phase.

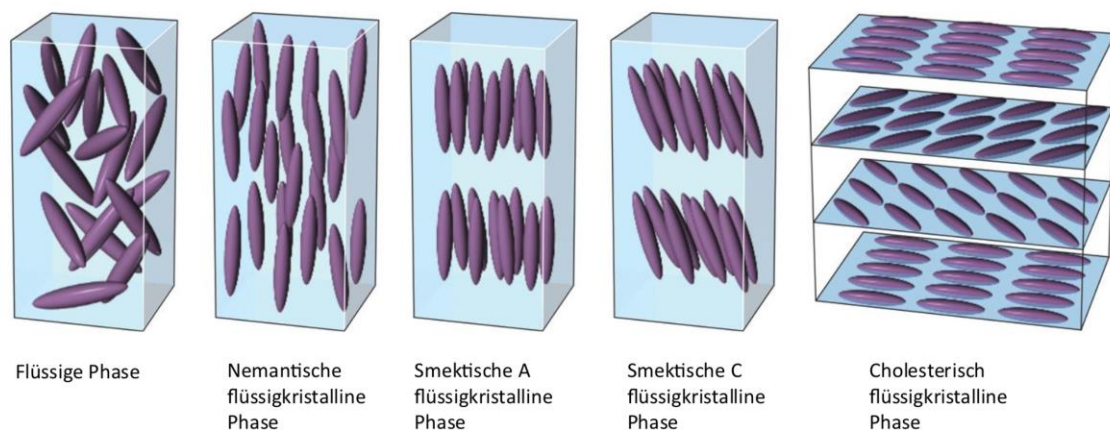


Abbildung 13: Molekulare Ordnung in nemantische, smektisch und cholesterische flüssigkristalline Phasen (Brown, et al., 2018) S.493

4.3.1 Nemantische Phase

Die nemantische Phase ist die einfachste und am häufigsten vorkommende Flüssigkristallphase. Sie ist vor allem in der LCD-Technologie von Bedeutung, da sich deren Enden mittels eines elektrischen Felds ausrichten lassen. Die Moleküle weisen eine eindimensionale Ordnung entlang des Direktors auf. Diese Ausrichtung hat aber keinen Einfluss auf die Enden der Moleküle, weshalb sie sich auch nicht auf einer Höhe befinden.³⁴ Somit verfügen sie über keinerlei positionelle Ordnung. In der nemantischen Phase entstehen meist sogenannte Fadentexturen oder Schlierentexturen.³⁵

³⁴ (Brown, et al., 2018)S.493.

³⁵ (Chemie.de, Flüssigkristall, 1997-2023).

4.3.2 Smektische Phasen

In den smektischen Phasen haben die Moleküle im Gegensatz zu der nematischen Phase sowohl eine orientierende Ausrichtung als manchmal auch eine positionelle Ausrichtung. Sie verfügen also über eine zweidimensionale Ordnung. Innerhalb der smektischen Phase können weitere spezifischere Gruppierungen vorgenommen werden. Je nachdem wie stark die einzelnen Schichten geordnet sind, unterscheidet man zwischen den Haupttypen Smektisch A und Smektisch C und der hexatischen Phase.³⁶

4.3.3 Smektisch A

Bei dieser flüssigkristallinen Phase sind die Moleküle innerhalb der Schichten ungeordnet und der Direktor steht senkrecht zur Schichtebene.³⁷

4.3.4 Smektisch C

Ebenfalls in dieser Phase verfügen die Moleküle in den Schichten über keine positionelle Ordnung. Der einzige Unterschied besteht darin, dass der Direktor nicht senkrecht zur Schichtebene steht, sondern einen anderen beliebigen Winkel einnimmt.³⁸

4.3.5 Smektisch hexatische Phase

Sobald in der Schichtebene die Mesogene ein hexagonales Gitter formen und somit einen Platz einnehmen, liegt neben der Orientierungsausrichtung auch noch eine positionelle Ordnung vor. Da diese nicht schichtübergreifend ist, spricht man auch von einer zweidimensionalen Bindungsorientierungsfernordnung.³⁹

³⁶ (Chemie.de, Flüssigkristall, 1997-2023).

³⁷ (Gurke, 1999)S.11.

³⁸ (Chemie.de, Flüssigkristall, 1997-2023).

³⁹ (Wurzbach, 2021).

4.3.6 Kristalline Mesophasen

Phasen, in denen die Positionsfernordnung schichtübergreifend ist, werden als kristalline Mesophasen bezeichnet. Es handelt sich nun nicht mehr um eine zweidimensionale, sondern um eine dreidimensionale räumliche Ordnung.⁴⁰

Zudem können weitere Differenzierungen der verschiedenen Phasen in ihrer thermischen Rotation um ihre Längsachse gemacht werden. Man unterscheidet zwischen gehinderter und ungehinderter Drehung. Während zum Beispiel die Moleküle des Kristalltyps E, H und K nur "flips" von 180 Grad machen können, ermöglichen alle anderen aufgelisteten Phasen eine kontinuierliche Bewegung.⁴¹

Non-Tilted Phases	Tilted Phases	In Plane Order	Molecular Rotation
smectic A	smectic C	none	unhindered
hexatic B	hexatic F, I	bond order	unhindered
crystal B	crystal G, J	positional	unhindered
crystal E	crystal H, K	positional	hindered

Tabelle1: thermische Rotationen (Hird Michael, 1997) S.10

4.3.7 Cholesterische Phase

Die cholesterische Phase hat in gewisser Hinsicht Ähnlichkeiten mit der nematischen Phase, da sich die Moleküle parallel sind. Man kennt sie deshalb auch unter dem Namen nematisch cholesterische Phase. Sie zeichnet sich durch eine Helix-Struktur aus. Dies bedeutet, dass der Direktor der ersten Schicht im Verhältnis zur Hauptachse der zweiten rotiert ist, bis eine Drehung stattgefunden hat. Diese Rotation wird mittels der chiralen Moleküle eingeleitet. Chiralität bedeutet nichts anderes, als dass die Moleküle durch Drehung nicht mit ihrem Spiegelbild deckungsgleich sind.⁴²

⁴⁰ (Hird Michael, 1997)S.9.

⁴¹ (Hird Michael, 1997)S.10.

⁴² (Chemie.de, Chiralität, 1997-2023).

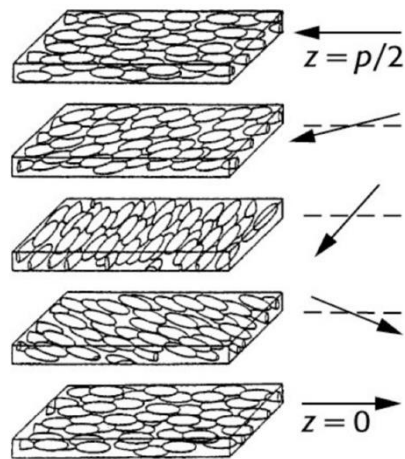


Abbildung 14: Ausrichtung der Moleküle in der cholesterische Phase, wobei p die Steigung der Spirale ist, (LEXIKON DER PHYSIK, Cholesterische Phase, 1998)

Cholesterische Flüssigkristalle sind auch in unserem Alltag bekannt, da sie als Thermometer fungieren können. Dies liegt daran, dass sie thermochrom sind. Dies bedeutet, dass sie ihre Farbe je nach Temperatur ändern können. Dies hat unter anderem mit ihren optischen Effekten zu tun. Falls die Wellenlänge im Bereich (400-780nm) liegt, wird weisses Licht gleichzeitig reflektiert und zirkular polarisiert.⁴³

4.4 Optische Eigenschaften

Die richtungsabhängigen physikalischen Eigenschaften, resultierend aus der Anisotropie von Flüssigkristallen, spielen eine fundamentale Rolle in der LCD-Technologie. Um später zu verstehen, was nun genau mit dem Licht passiert, wenn es die Polarisationsfolie durchquert und auf die Flüssigkristallschicht der LCD-Zelle trifft, und wie dadurch die Doppelbrechung entsteht, muss man zuerst das Licht als elektromagnetische Transversalwelle betrachten und deren Polarisierbarkeit.

⁴³ (LEXIKON DER PHYSIK, Cholesterische Phase, 1998).

4.4.1 Die elektromagnetische Welle

Unter einer elektromagnetischen Welle versteht man eine Welle, bei der sowohl das elektrische sowie auch das magnetische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle ausgerichtet sind. Gleichzeitig müssen die Feldlinien des elektrischen Felds orthogonal zu den Feldlinien des magnetischen Felds stehen. Bei Licht spricht man auch von einer Transversalwelle. Dies ist auch der Grund, weshalb sie polarisierbar ist.⁴⁴ Unter Polarisation versteht man die Schwingungsrichtung des elektromagnetischen Feldes. Je nachdem wie dieser Amplitudenvektor verläuft, entstehen dann entweder linear, zirkular oder elliptisch polarisierte Wellen.⁴⁵

Es gibt zwei Möglichkeiten eine elektromagnetische Welle zu betrachten: Entweder möchte man zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Momentaufnahme der Welle machen oder man möchte sie an einen bestimmten Ort als Funktion der Zeit datieren.^{46 47}

Um nun eine solche Welle zu beschreiben, werden zwei Größen verwendet. Einerseits der Wellen Vektor k_0 . Dieser ist Indikator für die Wellenzahl und gibt somit die Distanz λ_0 zwischen zwei Punkten mit derselben Amplitude an. In anderen Worten: Bis sich die Schwingung in gleicher Weise wiederholt.⁴⁸ Dabei nimmt die Wellenlänge mit steigendem k_0 Wert ab.⁴⁹ Andererseits gibt es die Winkel- oder Kreisfrequenz, welche aussagt, wie viele Schwingungen pro Zeitspanne stattfinden.

$$k_0 = |\vec{k}_0| = 2\pi/\lambda_0 \quad \text{and} \quad \omega = 2\pi/T.$$

Abbildung 15: Wellenvektor; Winkelfrequenz
(Hird Michael, 1997) S.228

In der Abbildung 15 sieht man das magnetische und elektrische Feld. Das magnetische verläuft entlang der y-Achse, während das elektrische entlang der x-Achse verläuft.⁵⁰ Da das magnetische Feld zwingend senkrecht zum elektrischen Feld steht, ist es üblich die

⁴⁴ (Götz, 2018)S.10.

⁴⁵ (Chemie.de, Polarisation, 1997-2023).

⁴⁶ (LEIFPhysik, Herleitung der Wellenfunktion, 2023).

⁴⁷ (Hird Michael, 1997)S.228.

⁴⁸ (Willig, Wellenzahl, 2023).

⁴⁹ (Gmelch & Reineke, 2019)Glossar.

⁵⁰ (Hird Michael, 1997)S.229.

Ausrichtung des Feldes hauptsächlich auf das elektrische Feld zu beziehen und das magnetische Feld zu vernachlässigen.⁵¹

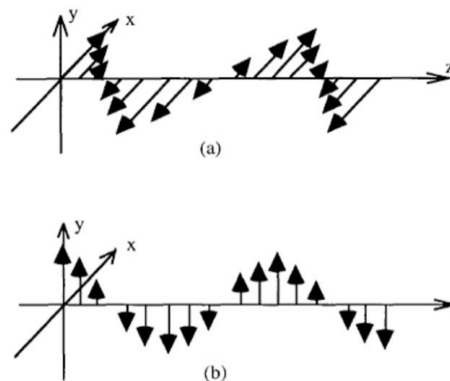


Abbildung 16: (a) elektrisches Feld; (b) magnetisches Feld
(Hird Michael, 1997) S.229

Grundsätzlich gilt, dass die Richtung der Polarisation frei ist, solange sie sich auf der Polarisationsebene befindet, in der Abbildung 17 als Rechteck dargestellt.⁵²

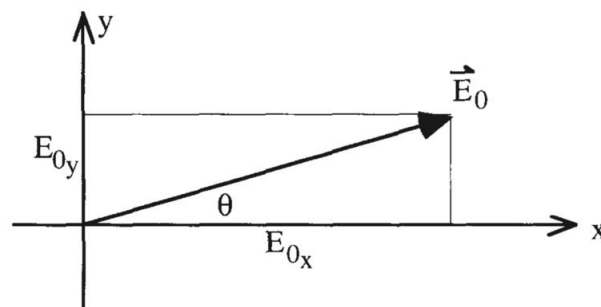


Abbildung 17: Richtungsvektor E_0
(Hird Michael, 1997) S.230

Der Winkel, den der Richtungsvektor E_0 zur x-Achse einschliesst, lässt sich aus dem Verhältnis zwischen E_{0x} und E_{0y} , berechnen.⁵³

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right)$$

Abbildung 18: Formel zur Winkelberechnung
(Hird Michael, 1997) S.229

⁵¹ (Hird Michael, 1997)S.229.

⁵² (StudySmarter, Polarisation, 2023).

⁵³ (Hird Michael, 1997)S.229.

4.4.2 Allgemeine Funktionsgleichung einer elektromagnetischen Welle

Um eine allgemeine Funktion des magnetischen und elektrischen Feldes zu beschreiben, braucht man eine Funktion, die die Ausbreitungsrichtung z in Abhängigkeit der Faktoren Raum und Zeit beschreibt. Es handelt sich um eine sinusförmige Schwingung. Es existieren zwar andere elektromagnetische Wellen, aber diese lassen sich aus zusammengesetzten Sinusfunktionen berechnen.⁵⁴

$$E_x(z, t) = E_{ox} \cos(kz - \omega t)$$
$$E_y(z, t) = E_{oy} \cos(kz - \omega t + \delta).$$

*Abbildung 19: Allgemeine elektromagnetische Welle mit x und y Komponente
(Hird Michael, 1997) S.230*

In dieser Gleichung (Abbildung 19) wird die Welle als Ort-Zeit-Funktion dargestellt. E_{ox} und E_{oy} entsprechen jeweils der Amplitude. kz entspricht der Phasenänderung der Welle, wenn man sich entlang der z -Achse bewegt. ωt gibt an, in welcher Periode sich die Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet. δ wird addiert, da es den Anfangszustand der Welle beschreibt. Je nachdem in welchem Bereich sich δ befindet, kommt es zu einer Phasenverschiebung. Diese ist wiederum ausschlaggebend, ob nun eine lineare, zirkulare oder elliptische polarisierte Welle entsteht.⁵⁵

4.4.3 Linear polarisierte Welle

Sobald der elektrische Feldstärkevektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung steht, spricht man von einer linearen Polarisation. Das heisst, es gibt entweder keine Phasenverschiebung, sprich $\delta=0$ oder δ liegt in einem Bereich von $\pm \pi$.⁵⁶

⁵⁴ (Hird Michael, 1997)S.230.

⁵⁵ (Hird Michael, 1997)S.230.

⁵⁶ (Hird Michael, 1997)S.230.

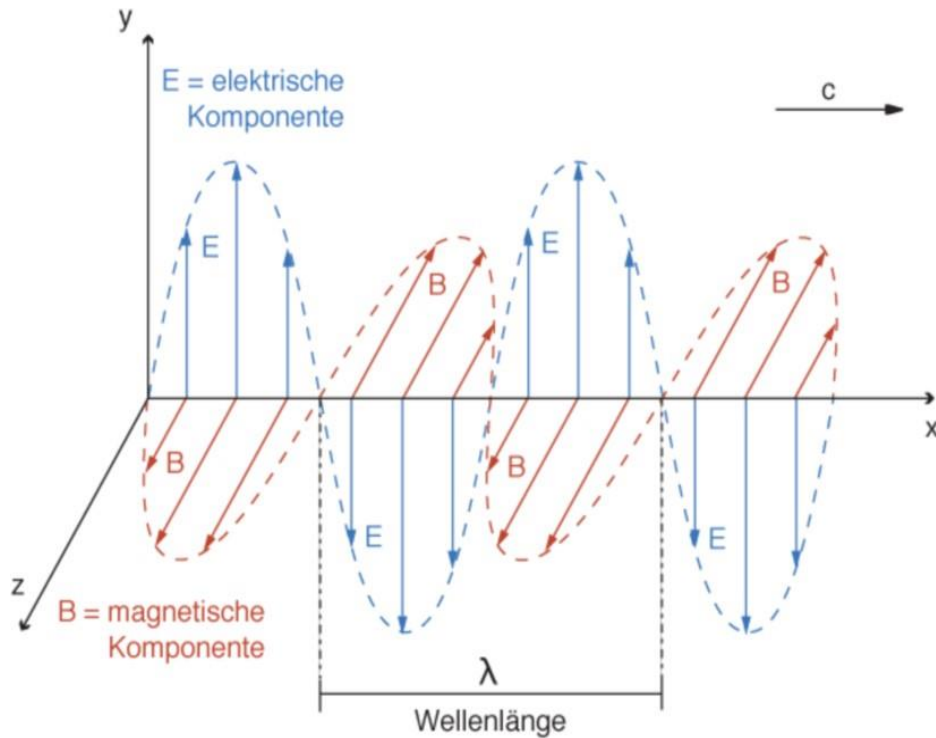


Abbildung 20: Aufbau einer linear polarisierten Welle (Grefkes, 2017)

4.4.4 Zirkular polarisierte Wellen

Bei zirkular polarisierten Wellen handelt es sich um eine besondere Form von elektromagnetischen Wellen. Ihr Name leitet sich von der Tatsache ab, dass der elektrische Feldvektor eine kreisförmige Bewegung ausführt. Dabei bleibt er in seiner Länge konstant.

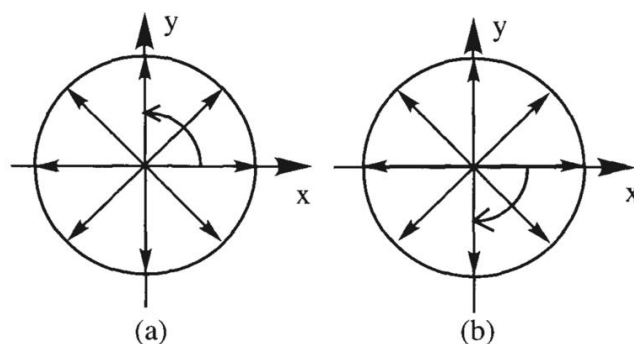


Abbildung 21: (a) links zirkular polarisierte (b) rechts zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen (Hird Michael, 1997) S.231

Das heisst $E_{0x} = E_{0y}$ und dreht mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit entweder im Uhrzeigersinn oder im Gegenuhrzeigersinn um die z-Achse. Somit gibt es eine Differenzierung zwischen rechts und links polarisierten Wellen.⁵⁷

Diese Art von polarisierten Wellen ist im Prinzip nichts anderes als zwei überlappende linear polarisierte Wellen, deren X und Y Komponenten um 90° phasenverschoben sind⁵⁸. Dies bedeutet, dass eine Welle ihren maximalen Wert (Wert der Amplitude) erreicht, während die andere sich gerade in der Mitte ihrer Schwingungsperiode befindet. Sie sind also um ein Viertel Schwingung verschoben.⁵⁹

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(-\omega t) = E_0 \cos(\omega t)$$

$$E_y(z, t) = E_0 \cos\left(-\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -E_0 \sin(-\omega t) = E_0 \sin(\omega t).$$

Abbildung 22: Komponenten eines rechts zirkular polarisierten elektrischen Feldvektors
(Hird Michael, 1997) S.230

In einer *rechts zirkular* polarisierten Welle entspricht $\delta = +\pi/2$ und es ist eine Drehung im Uhrzeiger zu beobachten, wenn man gegen die Ausbreitungsrichtung in die Lichtquelle blickt.⁶⁰

Hingegen wenn $\delta = -\pi/2$ ist, kommt es zu einer Drehung im Gegenuhrzeigersinn. Man geht von der gleichen Funktionsgleichung aus, sie hat jedoch ein anders Vorzeichen, was die entgegengesetzte Richtung erklärt. Man spricht auch von einer *links zirkularen* Polarisation.⁶¹

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(-\omega t) = E_0 \cos(\omega t)$$

$$E_y(z, t) = E_0 \cos\left(-\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_0 \sin(-\omega t) = -E_0 \sin(\omega t)$$

Abbildung 23: Komponenten eines links zirkular polarisierten elektrischen Feldvektors
(Hird Michael, 1997) S.231

4.4.5 Elliptische Polarisation

Bei der elliptischen Polarisation handelt es sich im Wesentlichen um eine Überlagerung einer linearen und zirkularen Polarisation. Dies ist der Fall, wenn $\delta = \pm \pi/2$ aber $E_{0x} \neq E_{0y}$.⁶²

⁵⁷ (von Ossietzky, 2023).

⁵⁸ (Hird Michael, 1997)S.230-231.

⁵⁹ (StudySmarter, Phasenverschiebung, 2023).

⁶⁰ (Hird Michael, 1997)S.230-231.

⁶¹ (Hird Michael, 1997)S.230-231.

⁶² (Hird Michael, 1997)S.231.

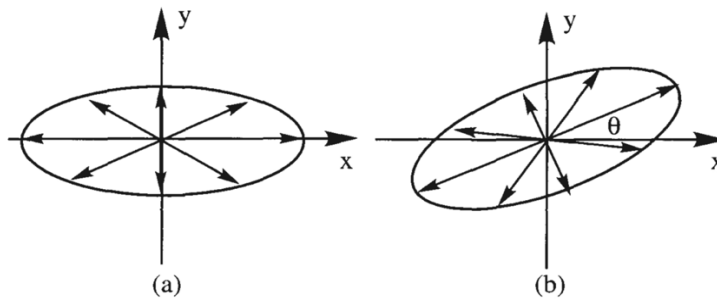


Abbildung 24: Elliptisch polarisierte elektromagnetische Welle
(Hird Michael, 1997) S.232

Die Halbachse der Ellipse verläuft dabei entweder entlang der x-Achse oder entlang der y-Achse. Dies ist wiederum davon abhängig, welche der beiden Komponenten dominiert. In der Abbildung 24 (a) ist die X Komponente stärker, weshalb die Ellipse auch entlang der x-Achse verläuft. Im Bild nebenan (b) überwiegt die Y Komponente, weshalb sich die Ellipse auch entlang der y-Achse ausrichtet. Hier entspricht zwar δ nicht einem Vielfachen von $\delta = \pm \pi/2$, aber es entsteht dennoch eine elliptisch polarisierte Welle. Deren Winkel zur x-Achse lässt sich aus dem Verhältnis zwischen E_{0x} und E_{0y} , wie in Abbildung 15 aufgeführt kalkulieren.^{63,64}

4.4.6 Brechungsindex (Brechzahl)

Mit dem Eintritt von Licht in ein bestimmtes Material wird die Geschwindigkeit der Wellenlänge um einen Faktor verlangsamt. Dessen Verhältnis zur Geschwindigkeit von Licht im Vakuum bezeichnet man als Brechungsindex $n=c/v$.⁶⁵ Aus n lässt sich unter anderem die Geschwindigkeit sowie die Wellenlänge berechnen.⁶⁶

$$v = c/n \text{ and } \lambda = \lambda_0/n$$

Abbildung 25: Geschwindigkeit v und Wellenlänge λ
(Hird Michael, 1997) S.233

⁶³ (Hird Michael, 1997)S.231.

⁶⁴ (Geowissenschaften, unbekannt).

⁶⁵ (Studyflix, 2023).

⁶⁶ (Hird Michael, 1997)S.235.

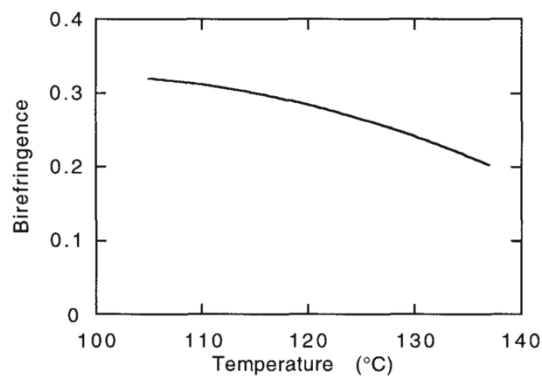


Abbildung 26: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex n
(Hird Michael, 1997) S.235

Die Darstellung illustriert, wie der Brechungsindex (n) mit steigender Temperatur abnimmt. Dieser Abfall ist eine direkte Folge der abnehmenden Ordnung innerhalb der flüssig-kristallinen Phase bei steigender Temperatur. Da die Intensität der Anisotropie vom Ordnungsparameter abhängig ist, passt sich n dementsprechend an.⁶⁷

4.4.7 Doppelbrechung

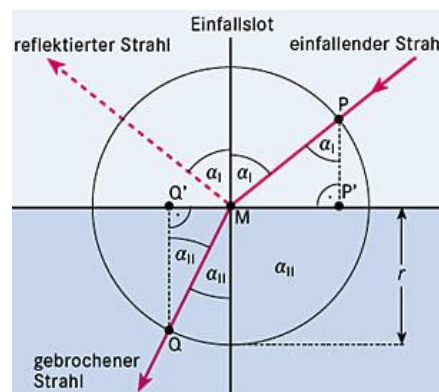


Abbildung 27: Geschwindigkeit v und Wellenlänge λ
(Lernattack.de, unbekannt)

Hierbei handelt es sich um ein physikalisches optisches Phänomen, wenn neben dem reflektierten Strahl ein weiterer Strahl entsteht, der sogenannte gebrochene Strahl. In

⁶⁷ (Hird Michael, 1997)S.235.

welchem Winkel dieser gebrochene Strahl eintritt, namentlich Brechungswinkel α_{II} , lässt sich mit Hilfe des Brechungsindex der beiden Materien berechnen.⁶⁸

$$\frac{\sin \alpha_I}{\sin \alpha_{II}} = \frac{n_{II}}{n_I}$$

*Abbildung 28: Formel des Brechungsgesetzes
(Lernattack.de, unbekannt)*

Es ist auch eine Eigenschaft, welche sich anisotropen Medien zuschreiben lässt und deshalb auch für Flüssigkristalle von Bedeutung ist. Denn die Dielektrizitätskonstante/Permittivitätskonstante ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$)⁶⁹ ist in Flüssigkristallen richtungsabhängig, wodurch die Doppelbrechung veranlasst wird. Somit unterscheidet sich der Brechungsindex für linear polarisiertes Licht in verschiedenen Richtungen. In der nematischen Phase bedeutet das konkret, dass Licht, welches senkrecht zum Direktor polarisiert ist (n_{\perp}), einen anderen Brechungsindex aufweist als das Licht, das parallel zum Direktor polarisiert (n_{\parallel}) ist. Daraus resultiert $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ als Formel für die Doppelbrechung.⁷⁰

⁶⁸ (Lernattack.de, unbekannt).

⁶⁹ (LEXIKON DER PHYSIK, Dielektrizitätskonstante, 1998).

⁷⁰ (Hird Michael, 1997)S.235.

5 Praktischer Teil

In diesem Kapitel soll das erworbene Wissen in der Praxis angewendet werden. Es soll verstanden werden, was genau eine LCD-Zelle ist, wie sie aufgebaut ist und wie sie funktioniert. Um sich ein tieferes Verständnis zu erwerben, soll mittels eines selbstständigen Baues eine funktionstüchtige LCD-Zelle konstruiert werden. Zudem soll das Zusammenspiel in einem LED-Display verstanden werden.

5.1 Aufbau einer LCD-Zelle

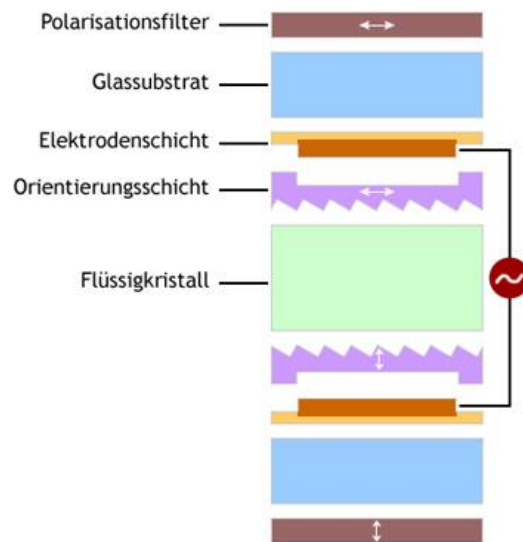


Abbildung 29: Zusammensetzung einer LCD-Zelle
(Dornik, 2005)

Eine typische twisted nematic LCD-Zelle besteht aus zwei Polarisationsfolien, welche um 90° gegeneinander gedreht sind. Man nennt dies auch Kreuzpolarisation. Zwischen diesen Folien befinden sich zwei Glasplättchen, die mit Indium-Zinn-Oxid beschichtet sind. Das ITO ist essenziell, da es die Plättchen leitfähig macht und als Elektrode fungiert. Zusätzlich gibt es noch eine dünne transparente Orientierungsschicht von 100nm, die meist aus einem organischen Material wie zum Beispiel ein Polyimid besteht. Diese Schicht wird anschliessend in spezifischer Weise strukturiert, um Rillen zu erzeugen, welche in Richtung des linear polarisierten Lichts verlaufen.⁷¹

⁷¹ (Lueder, 2010)S.12.

Wichtig ist dabei, dass die Rillen der einen Glasplatte senkrecht zur anderen stehen. Diese Einbuchtungen werden anschliessend mit Flüssigkristallen gefüllt. Diese Flüssigkristallschicht befindet sich normalerweise in der nematischen Phase, da sie sich bei Raumtemperatur in der flüssigen Phase befindet und Flüssigkristalle in anderen Schichten ständig geheizt werden müssten, zeigen sich diese in der Praxis als eher ungeeignet. Die Moleküle werden somit parallel ausgerichtet, jedoch mit einem marginalen Winkel zur Orientierungsschicht aufgrund eines vordefinierten Neigungswinkels α_0 .⁷²⁷³

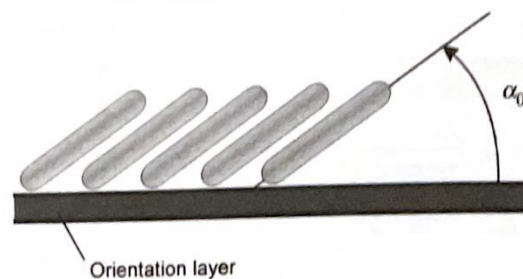


Abbildung 30: Neigungswinkel
(Lueder, 2010) S.14

5.2 Funktionsweise einer LCD-Zelle

Was nun geschieht, wenn keine Spannung angelegt ist (0V), dann passiert das Licht der Hintergrundbeleuchtung die Polarisationsfolie und wird somit linear polarisiert. Anschliessend durchquert es die erste Glaselektrode. Zunächst gibt es keine Veränderung in der Polarisation. Da die Orientierungsschicht auf beiden Glasplättchen vorher in die Richtung des linear polarisierten Lichts gerieben wurde. Da die Rillen aber senkrecht zueinanderstehen, sind die Stabmoleküle der Flüssigkristallschicht, gezwungen sich um 90° zu drehen. Es wird also eine Helix geformt und dies ohne die Zugabe von chiralen Verbindungen. Innerhalb der Flüssigkristallschicht kommt es nun zur Doppelbrechung aufgrund der richtungsabhängigen Dielektrizitätskonstante. Somit bewegen sich die linear polarisierten Wellen unterschiedlich schnell, weshalb sie irgendwann überschneiden, wodurch vorerst elliptisch polarisiertes Licht entsteht. Sobald aber die Distanz $d/2$ entspricht, entsteht zirkular polarisiertes Licht und

⁷² (Dornik, 2005).

⁷³ (Lueder, 2010)S.12-14.

später wieder erneut elliptisch polarisiertes Licht. Falls nun $d = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{\lambda}{\Delta n}$ entspricht, treffen die Wellen linear polarisiert auf den Analysator. Da die Polarisationsfolie aber um 90° gedreht ist, kann das Licht problemlos den Polarisationsfilter passieren und die LCD-Zelle erscheint weiss. Es entsteht der *Normally-White-Mode*.⁷⁴

Legt man hingegen eine Spannung an, richten sich die Moleküle parallel zur Feldrichtung, aber senkrecht zur Orientierungsschicht aus. Somit löst sich die Helix Struktur auf und das Licht trifft auf die zweite Polarisationsfolie, welche selbst um 90° gedreht ist, dementsprechend kann das Licht den Analysator nicht passieren. Es wird also blockiert und man erhält ein schwarzes Bild. Man spricht auch vom *Normally-Black-Mode*.⁷⁵

5.3 LED-Display

Mit der vorherig genannten Methode wäre jedoch nur Fernsehen in Schwarz-Weiss möglich, aber heute können wir farbenfrohe Bilder geniessen. Um zu verstehen, wie das möglich ist, wird der Aufbau eines LED-Displays betrachtet.

Da unser Fernsehdisplay nicht nur aus einer riesigen LCD-Zelle besteht, sondern aus 1920*3*1080⁷⁶ Pixeln im Falle eines Full-HD-Displays, welche zusammen die Bildübertragung ermöglichen, müssen weitere Bestandteile eingeführt werden, die das Zusammenspiel der Bauteile ermöglichen.

Eines der wichtigsten Elemente für einen Farbdisplay sind die sogenannten Farbfilter. Sie bestehen aus drei Subpixel der Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB), zusammen bilden sie einen Pixel. Sie werden hinter der ersten Glaselektrode angebracht. Im Falle eines Fernsehers werden sie in Diagonalen angeordnet, dies ermöglicht das Erzeugen eines homogenen Bildes aus der Distanz und aus verschiedenen Winkeln. Zwischen den Pixeln befindet sich jeweils eine sogenannte Schwarze Matrix, welche eine geringe Reflexion aufweist und absorbierend wirkt. So wird verhindert, dass Licht zwischen den Pixeln hindurchtritt. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass jeder Bildpunkt über einen Farbfilter verfügt.⁷⁷

⁷⁴ (Lueder, 2010)S.12-14.

⁷⁵ (Dornik, 2005).

⁷⁶ (Lueder, 2010)S.12.

⁷⁷ (Lueder, 2010)S.16-18.

Zwischen der Flüssigkristallschicht und der zweiten mit ITO beschichteten Glasplatte befindet sich auch noch eine Matrix von Thin Film Transistors (TFT), welche mit einer Sample and Hold Schaltung gesteuert werden. Die TFTs erfahren einen elektronischen Impuls und betätigen alle Transistoren der Zeile. Ein weiterer Impuls der Spaltenelektrode sorgt dann für die effektive Aktivierung der Zelle.⁷⁸

Zu guter Letzt brauchen wir noch eine Hintergrundbeleuchtung, damit Licht in das System gelangen kann. Bei früheren LCD-Displays wurde eine Leuchtstoffröhre eingesetzt. Diese Methode ist mittlerweile aber veraltet, vielmehr werden Light Emitting Diodes (LED) verwendet. Sie brauchen weniger Platz, sind energiesparender und haben eine längere Lebensdauer.⁷⁹

⁷⁸ (Mietke, 2002-2023).

⁷⁹ (Lueder, 2010)S.12-14.

6 Vorgehen

6.1 Material und Methodik

Im ETH-Labor angekommen hatte man sich, wie es sich gehört, Handschuhe, Schutzbrille und Kittel übergezogen, bevor man sich an das Zusammensetzen einzelner Bausteine der LCD-Zelle wagte. Als Erstes wurden zwei mit ITO (Indium Zinnoxid) beschichtete Objektträger in einer Dicke von ($5\mu\text{m}$) genommen und getestet, welche Seite leitend ist und welche nicht. Dies wurde mit Hilfe von einem Multimeter gemacht, in dem gemessen wird, welche Seite eine Spannung aufweist. Beide Seiten der Glasplättchen wurden nun vorerst gründlich mit Ethanol gereinigt, um erste gröbere Partikel loszuwerden.

Danach kam es schon zur Plasmareinigung. Hierbei handelt es sich um eine Methode, die Schadstoffe, Verunreinigungen und jegliche Mikroorganismen von der Oberfläche entfernen kann. Es wird eine Hochfrequenzspannung erzeugt, welche das Gas ionisiert. Hierbei war effizientes Handwerk gefragt, ansonsten hätte die Möglichkeit bestanden, dass eine Reaktion mit Sauerstoff stattgefunden hätte.

Damit nun das Polymer (Poly-Alkyl-Poly-Isocyanat) gleichmässig auf der Glasscheibe distribuiert werden konnte, auch papi-coating genannt, kam die spin-coating Maschine zum

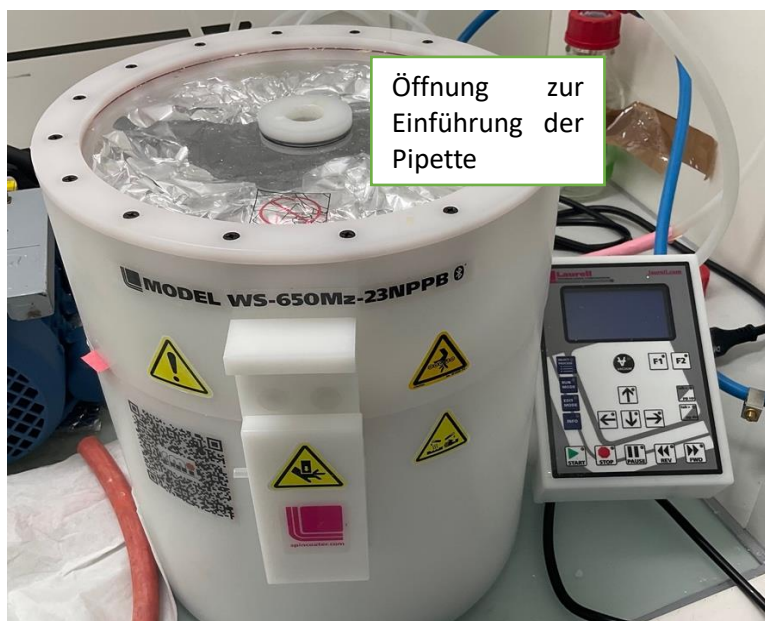


Abbildung 31: spin coating Maschine (ETH-Labor);
(eigenes Foto, 2023)

Einsatz. Vorerst wurde das Polymer nur auf die Seite ohne ITO aufgetragen, dies wurde aber in den Versuchen zwei, drei und vier angepasst.

Das Substrat wurde auf dem Halter der Maschine mittig platziert und das Gerät in Betrieb gesetzt. Die Platte drehte sich dabei mit einer erstaunlichen Geschwindigkeit von 4000 Umdrehungen pro Minute um ihre eigene Achse. Um das Wegrutschen des Substrates zu verhindern, bildete sich im Inneren der Maschine ein Vakuum, welches das Plättchen mit einer Kraft von 1 bar an Ort und Stelle hielt. Anschliessend wurde eine Pipette der Füllmenge von 10^{-3} mm des Polymers schnell und kontrolliert via Öffnung in die Mitte getropft. Aufgrund der Zentrifugalkraft und der hohen Geschwindigkeit wurde die Substanz nach aussen gedrückt, wodurch sich ein homogener Film bilden konnte.

Daraufhin wurden die Objektträger auf eine Heizplatte gelegt und auf 80° Celsius erhitzt, da das Lösungsmittel giftig ist. Um eine potenzielle Reaktivität auszuschliessen wäre jedoch eine Temperatur von 200°C erforderlich, doch da das Polymer über eine niedrigere Schmelztemperatur verfügt hätte es den Vorgang nicht überstanden. Dieser Prozess dauerte zwischen zehn bis zwanzig Minuten.

Nach der Abkühlungsphase sollte eine bevorzugte Orientierung für die Flüssigkristallmoleküle induziert werden. Dies wurde durch eine Reibmaschine ermöglicht, deren Spirale mit Samt überzogen ist. Das Substrat wurde exakt in die Mitte der Ablage zentriert, so dass die Seite mit dem papi-coating nach oben zeigte. Danach passte man die Startposition auf die Dicke des Objektträgers an. Anschliessend hob sich die Plattform auf die gewünschte Höhe, und die umhüllte Rolle bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s über das Substrat. Es fand dabei jedoch keine vollständige Berührung statt, sondern nur eine Streifung, welche sich durch ein Zischgeräusch identifizieren liess. Damit man später auch feststellen konnte, in welche Richtung der Prozess stattgefunden hatte, wurde die Reibrichtung in der Ecke mit einem Marker gekennzeichnet.

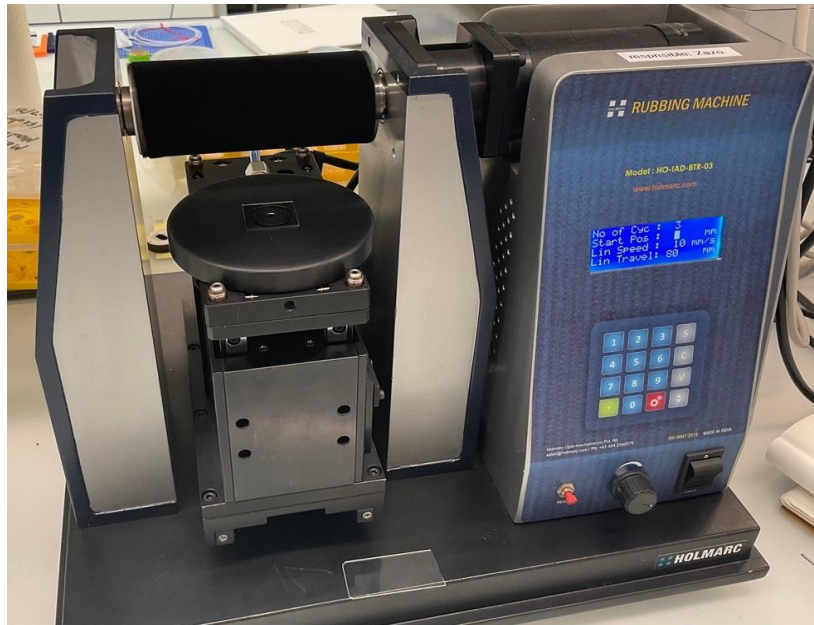


Abbildung 32: Reibmaschine (ETH-Labor)
(eigenes Foto, 2023)

Um die spätere Konstruktion einer LCD-Zelle zu ermöglichen, war es notwendig zwei dieser beschichteten und geriebenen Glasplättchen miteinander zu verbinden, um ein geschlossenes System zu schaffen. Dabei war es wichtig, dass die beiden präparierten Seiten einander zugewandt waren, um eine Adhäsion und Interaktion zwischen den Oberflächen zu erreichen. In einem ersten Versuch verwendete man ein Zellband in einer Dicke von $5\mu\text{m}$, welches an die Ränder des Glases angebracht wurde. Ein präzise festgelegter Zwischenraum wurde aber bewahrt, um in einem nächsten Schritt die Flüssigkristalle mittels Kapillarkraft erfolgreich in das Innere der Zelle befördern zu können. Jedoch zeigte sich im Verlauf weiterer Untersuchungen, dass diese Methode nur suboptimale Resultate erzielte. Diese Erkenntnisse führten zur Verwerfung der Anwendung des Zellbandes und infolgedessen kam ein alternatives Verbindungsmittel zum Einsatz, der UV-Kleber.

Im Rahmen des Initialversuchs griff man auf 8 CB, thermotrope Flüssigkristalle zurück. Da diese sich bei Raumtemperatur in der kristallinen Phase befinden, musste man die Zelle nach dem Einfüllen durch die Zwischenräume mit den Flüssigkristallen auf 90° Celsius erhitzen. Hier kam dann die Heizplatte erneut zum Einsatz. Somit konnte der Phasenübergang von der kristallinen zur smektischen Phase stattfinden. Doch das Verwenden von 8 CB stellte sich als ungeeignet heraus, weshalb man es in den folgenden Versuchen mit 5 CB ersetzte. Hierbei handelt es sich

um ein Flüssigkristall, der sich bei Raumtemperatur in der nematischen Phase befindet. In den Versuchen zwei, drei und vier wurden zusätzlich noch Kolloide hinzugegeben.

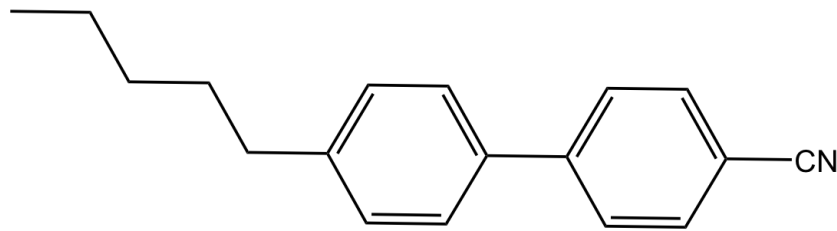


Abbildung 33: 5CB Flüssigkristall
(eigene Darstellung, 2023)

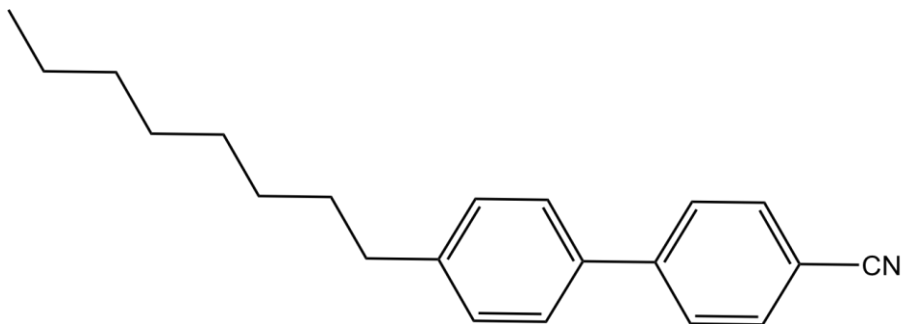


Abbildung 34: 8CB Flüssigkristall
(eigene Darstellung, 2023)

Nun musste noch ein elektrisches Feld erzeugt werden. Es wurden zwei Kabel verwendet. Anschliessend sollte an einem Ende ein Plus und am anderen ein Minuspol kreiert werden. Dafür wurden zweierlei Kabel verwendet, die als Elektroden fungieren und dessen Enden entblättert wurden, um den inneren Draht freizulegen und eine direkte elektrische Verbindung zu ermöglichen. Damit die Stabilität der Konstruktion gewährleistet werden konnte, wurden die Enden mithilfe einer Zinnlötverbindung an das Substrat angebracht.

Die LCD-Zelle wurde dann an einen Wellenformgenerator angeschlossen, welcher den benötigten Wechselstrom induzierte. Doch da die Verbindung sich als weit instabiler als ursprünglich angenommen herausstellte, wurden in den kommenden Versuchen eine andere einfachere Methode verwendet. Man ist auf die Idee gekommen Kabel zu gebrauchen, welche vorne jeweils eine Klammer haben, auch Krokodilklemmen genannt, um gegen allfällige Instabilitäten vorzugehen und Kontaktstörungen zu vermeiden. In einem späteren Versuch

war es möglich mittels einer Batterie einen Stromkreis zu erzeugen und so ein genug starkes elektrisches Feld implizieren zu können.

Zu guter Letzt wurden zwei Polarisationsfolien implementiert. Diese wurden übereinandergelegt, so dass sie in einem Winkel von 90° zueinanderstanden. Man nennt dies auch Kreuzpolarisation. Die LCD-Zelle wurde dann zwischen den Folien in einem Winkel von 45° platziert. Anschliessend wurde eine Hintergrundbeleuchtung benötigt, anfangs mittels eines Lichtmikroskops, was aber Komplikationen mit sich brachte, weshalb man sich später dann auch für die Taschenlampe des Mobiltelefons entschied.

So konnte die Lichtundurchlässigkeit ermöglicht werden, welche gebraucht wurde, um den Übergang von hell zu dunkel zu sehen, sobald der Strom eingeschaltet wurde und die Moleküle sich auszurichten begannen. Denn erst als die Moleküle ausgerichtet waren, blockierte der zweite Filter das Licht erneut, weshalb die Anzeige dunkel erschien. Sobald die Moleküle aber nicht mehr ausgerichtet waren, passierte das Licht den zweiten Filter und der Bildschirm wurde hell. Aufgrund des Wechselstromes konnte man einen kontinuierlichen Wechsel beobachten.

Beim ersten Versuch erfolgte die Betrachtung unter einem Lichtmikroskop. Bei den folgenden hat hingegen eine Beobachtung von Auge stattgefunden.

7 Ergebnisse

7.1 Versuch 1

Man versuchte mit verschiedenen Spannungen ein genug starkes elektrisches Feld zu erzeugen. Doch als man die LCD-Zelle unter dem Lichtmikroskop betrachtete, konnte man selbst mit 10V nur einen minimalen Wandel von hell zu dunkel zu beobachten. Weshalb man nicht von einer funktionierenden Anzeige sprechen konnte. Es wurde demnach eine Fehleranalyse vollzogen und man ist zum Schluss gekommen, dass mehrere Kleinigkeiten zur Problematik beitrugen. Zum einen war das Mikroskop mit einem zirkularen Polarisator versehen, zum anderen war das elektrische Feld viel zu schwach. Dies lag hauptsächlich an der Dicke der Zelle.

Des Weiteren führte die smektische Phase des verwendeten 8 CB zu Schwierigkeiten. Denn damit dieser Flüssigkristall auch in dieser Phase bleibt und nicht zur kristallinen Phase übergeht, musste dem Substrat ständig Hitze zugefügt werden. Dafür wurde eine spezifisch konfigurierte Heizplatte verwendet, doch die LCD-Zelle war zu gross und passte nicht auf die Halterung, weshalb man das Präparat schwebend über der Platte befestigen musste. Wie auch im nachfolgenden Bild zu sehen ist, traten Komplikationen bei der Zinnlötung auf, denn das Glas reagierte abweisend und nur nach der kleinsten Bewegung löste sich die Verbindung bereits. Dies ist auch der Grund, weshalb ein Tape verwendet wurde, um wenigstens eine gewisse Stabilität zu gewährleisten. Es lässt sich zudem vermuten, dass das Indium Zinnoxid durch das Erwärmen beschädigt wurde und dass es zu einer Aushärtung des papi-coating kam aufgrund des nicht diffusen Lichtes. Da es sich um ein fotoreaktives Polymer handelt.



Abbildung 35: LCD-Zelle auf Heizplatte (ETH-Labor)
(eigenes Foto, 2023)

7.2 Versuch 2

Im zweiten Versuch wurden mehrere Änderungen vorgenommen. Zunächst wurde nun das papi-coating auf derselben Seite wie das ITO angebracht, um eine räumliche Nähe zu den Elektronen zu gewährleisten. Anschliessend erfolgte das Reiben nur einer Glasplatte, da dies im Prinzip ausreichend sein sollte, um eine Ausrichtung zu erzeugen. Des Weiteren wurde eine grundlegende Veränderung vorgenommen: Anstelle des bisher verwendeten 8 CB kam es zur Umstellung auf 5 CB. Dieser Flüssigkristall befindet sich bei Raumtemperatur in der nematischen Phase. Dessen Moleküle verfügen über eine rein orientierende Ausrichtung aber über keinerlei positionelle Ordnung. In der smektischen Phase hingegen ordnen sich die Moleküle in Schichten an, weshalb sie sich weniger gut ausrichten lassen und es schwieriger ist sie mittels eines elektrischen Feldes zu steuern. Zusätzlich wurden winzige Kolloide, welche sich als kreisrunde Punkte in der Anzeige bemerkbar machten, hinzugefügt. Dies wurde jedoch aus rein ästhetischen Gründen vollzogen mit der Absicht ein spektakuläreres Bild als nur eine schwarze Anzeige zu erhalten. Nach der Zugabe der Flüssigkristalle wurde die LCD-Zelle nun anstelle des Zellbandes mit einem UV-Kleber versiegelt. Dieser wurde tröpfchenweise auf das Substrat gegeben, und nach dem Zusammenkleben der beiden Glasplättchen wurde das Präparat in eine UV-Aushärtebox gelegt, um den Leim auszuhärten.

Nach erfolgreichen Anpassungen zeigte sich eine markante Verbesserung in der Leistung. Dies sogar ohne Verwendung eines Mikroskops und reiner Betrachtung mit blossem Auge. In den

nachfolgenden Bildern ist ein klarer Übergang von hell zu dunkel zu sehen. Somit funktionierte die Ausrichtung der Moleküle unter Stromzufuhr. Man kann grundsätzlich von einer funktionierenden LCD-Zelle sprechen. Diese signifikanten Fortschritte bildeten den Grundbaustein für spätere Versuche. Denn das Ziel war es eine Zelle zu bauen, die mit einer Batterie betätigt werden kann und nicht nur unter Anschluss an einen Generator funktioniert.



Abbildung 36: Moleküle der Flüssigkristallschicht richten sich aus aufgrund des erzeugten elektrischen Feldes (eigenes Foto, 2023)

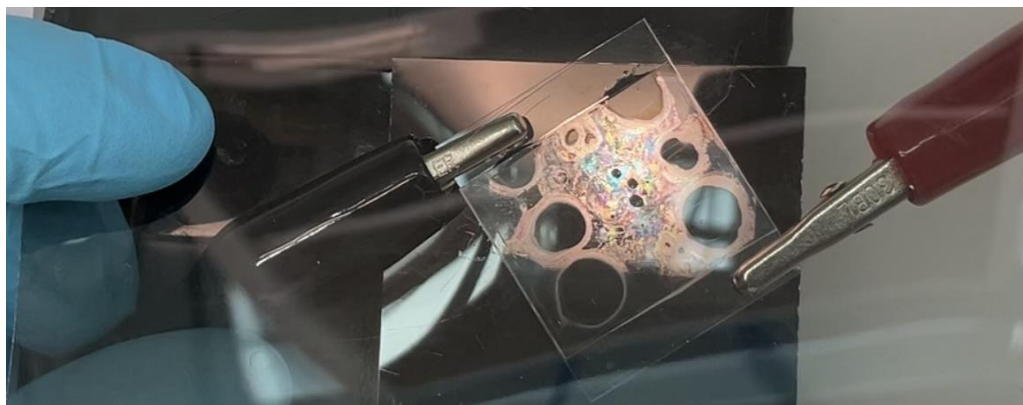


Abbildung 37: Moleküle sind nicht ausgerichtet, da kein elektrisches Feld vorhanden ist (eigenes Foto, 2023)

7.3 Versuch 3

Im dritten Versuch wurde basierend auf den Fortschritten des letzten Versuches nach weiteren Methoden gesucht, um die Funktionalität der LCD-Zelle zu optimieren. Aufgrund der Dicke der Objektträger von $5\mu\text{m}$ und der Tatsache, dass die elektrische Feldstärke quadratisch mit der Entfernung abnimmt, kam man nun auf die Idee, ein dünneres ITO-Präparat zu gebrauchen. Dieses war nur $4\mu\text{m}$ dick und so konnte die Zelle auch in einem schwächeren elektronischen Feld betriebsfähig sein.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Abbildung 38: Elektrische Feldstärke in einem Kondensator
(The LibreTexts, unbekannt)

Des weiteren wurde die Lichtquelle reglementiert. Es wurde nach einer Methode gesucht, die diffuses Licht erzeugen kann. Da das Labor aber keine Diffusionsfolien zur Verfügung hatte, musste nach Alternativen gesucht werden. Man ist dann auf die Idee gekommen Milchglas Objektträger zu verwenden, welche im Grunde einen ähnlichen Effekt haben. Doch ein Objektträger allein bewirkte keine fundamentalen Unterschiede, weshalb mehrere übereinandergeschichtet werden mussten. Dies hatte aber eine willkürliche Diffusion zur Folge, so dass das Licht so grell war, dass man beinahe nicht mehr sehen konnte, was im Inneren der LCD-Zelle vor sich ging. Deshalb musste diese Idee verworfen werden und man griff zur alten Methode zurück. Um die Umstände aber ein wenig zu verbessern, wurde auf dem Mobiltelefon eine App heruntergeladen, die das Licht der Taschenlampe diffundieren kann, was erstaunlicherweise zu sehr guten Resultaten führte.

Die LCD-Zelle funktionierte unter Anschluss an den Wellengenerator. Im letzten Test wurde jedoch getestet, ob sie auch mit einer Batterie funktionstüchtig ist. Erfreulicherweise hat die Zelle den Test überstanden und ein signifikanter Übergang von hell zu dunkel war ersichtlich. Somit konnte das ursprüngliche Ziel erreicht werden.



Abbildung 39: Links sind die Moleküle nicht ausgerichtet, rechts sind die Moleküle ausgerichtet
(eigenes Foto, 2023)

7.4 Versuch 4

Im vierten Anlauf wurde versucht ein Logo zu kreieren, welches auf der Anzeige erscheinen soll. Dafür wurden mit Klebeband die Buchstaben der ETH auf die Glasscheibe geklebt. Anschliessend wurde die Scheibe mit einem dünnen Film von Gold überzogen, welcher später als Elektrode fungieren sollte. Dies wurde mit Hilfe von einem Metall Evaporator gemacht. Nach diesem Prozess musste der Kleber wieder in Aceton aufgelöst werden, um freie Stellen aus reinem Glas zu erhalten. Leider gab es bei diesem Schritt bereits Komplikationen, weshalb der Versuch abgebrochen werden musste. Denn nach langem Warten hatte sich der Kleber nicht vollständig aufgelöst. Falls sich der Kleber jedoch irgendwann aufgelöst hätte und die Umsetzung möglich gewesen wäre, hätte die LCD-Zelle nicht mit einer Batterie funktioniert, da sie aufgrund der zusätzlichen Goldschicht in ihrer Dicke zunahm und man deshalb ein stärkeres elektrisches Feld gebraucht hätte. Selbst beim Anschluss an den Generator hätte es keine Sicherheit gegeben, dass man ein genug starkes Feld erzeugen hätte können.

8 Auswertung der Ergebnisse

8.1 Reaktionszeiten der LCD-Zellen

Wie man bereits aus den Versuchsdarstellungen entnehmen kann, fand offensichtlich ein Farbwechsel statt. Dies wiederum zeigt, dass die Moleküle gezielt ausgerichtet werden konnten und somit eine Lichtundurchlässigkeit gewährleistet wurde. Doch um genauere Aussagen über die Funktionalität der Zellen treffen zu können, wurden sie auf ihre Reaktionszeit getestet. Es wurde also gemessen, wie lange ein Wechsel von weiss zu schwarz und wie lange ein Wechsel von schwarz zu weiss dauert. Da eine LCD-Zelle keinen vollkommenen Schwarzpunkt erreichen kann, entspricht die wahre Reaktionszeit dem Wechsel von grau zu grau. Diese Farbwechsel wurden anschliessend grafisch festgehalten. Im Labor wurden Aufnahmen gemacht und mit Hilfe eines Videoschneidertools konnte auf die Millisekunde genau datiert werden, wie lange die LCD-Zelle braucht, um vom unausgerichteten Zustand in den ausgerichteten Zustand überzugehen. Hierbei ist jedoch wichtig zu beachten, dass keine exakten Messungen für die Grauzwischenstufen gemacht werden konnten. Man weiss aber, dass der Wechsel von Weiss zu einem Grauton sehr schnell geht. Bis die Anzeige dann vollkommen „schwarz“ erscheint, dauert es etwas länger. Die Anzeige bleibt anschliessend für einen kurzen Zeitpunkt im ausgerichteten Zustand, bevor die Moleküle wieder unausgerichtet sind.

8.1.1 Versuch 1

Da man beim ersten Versuch kein Übergang von hell zu dunkel erreicht werden konnte, war die Prüfung auf dessen Reaktionszeit leider unmöglich.

8.1.2 Versuch 2

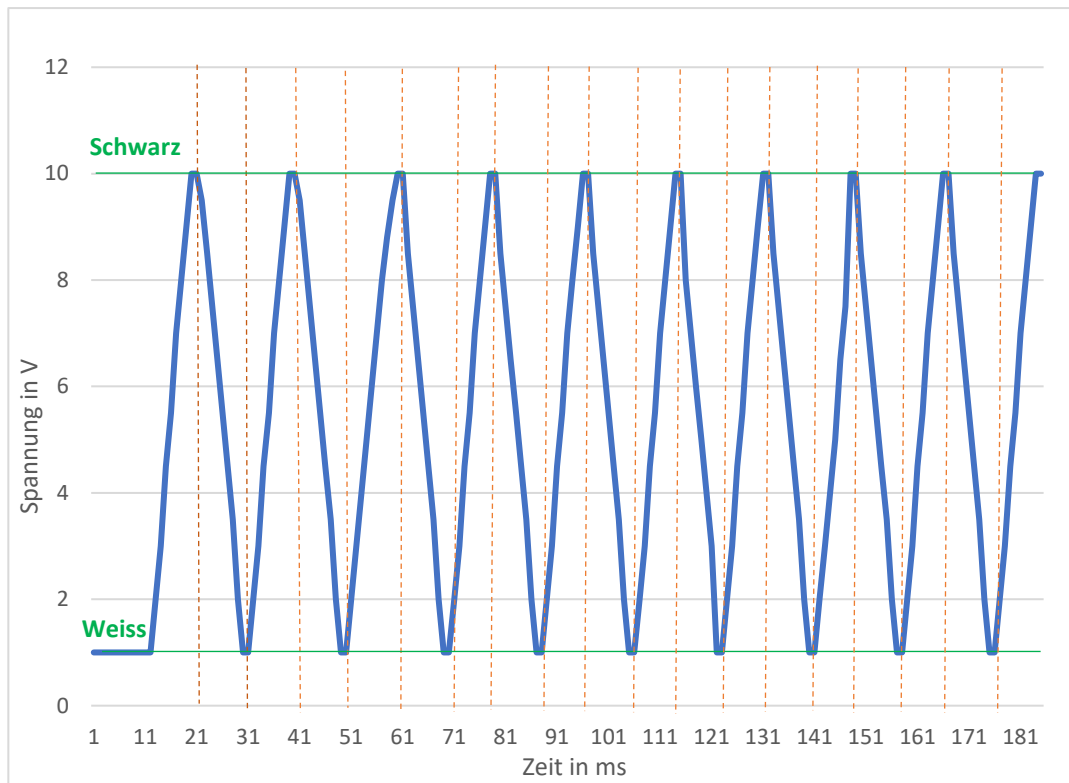


Abbildung 40: Reaktionszeit Versuch 2
(eigene Grafik, 2024)

Wie im folgenden Diagramm (Abbildung 40) ersichtlich ist, hat ein Farbwechsel stattgefunden. Beim Betrachten fällt auf, dass die LCD-Zelle anfangs etwas verzögert auf das elektrische Feld reagiert (11ms), sich aber im Verlaufe von nur wenigen Millisekunden eine ausgeglichene Wechselwirkung einspielte. Im Durchschnitt dauerte es 8.4 ms, bis ein Wechsel von weiss zu schwarz stattgefunden hatte, und 8.1 ms von schwarz zu weiss. Es konnte also eine durchschnittliche Reaktionszeit von 16.5 ms erreicht werden. Jedoch benötigte dieser Versuch eine hohe Spannung von 10V und konnte somit nur mittels eines Wellengenerators betrieben werden.

8.1.3 Versuch 3

Am Generator mit 9V:

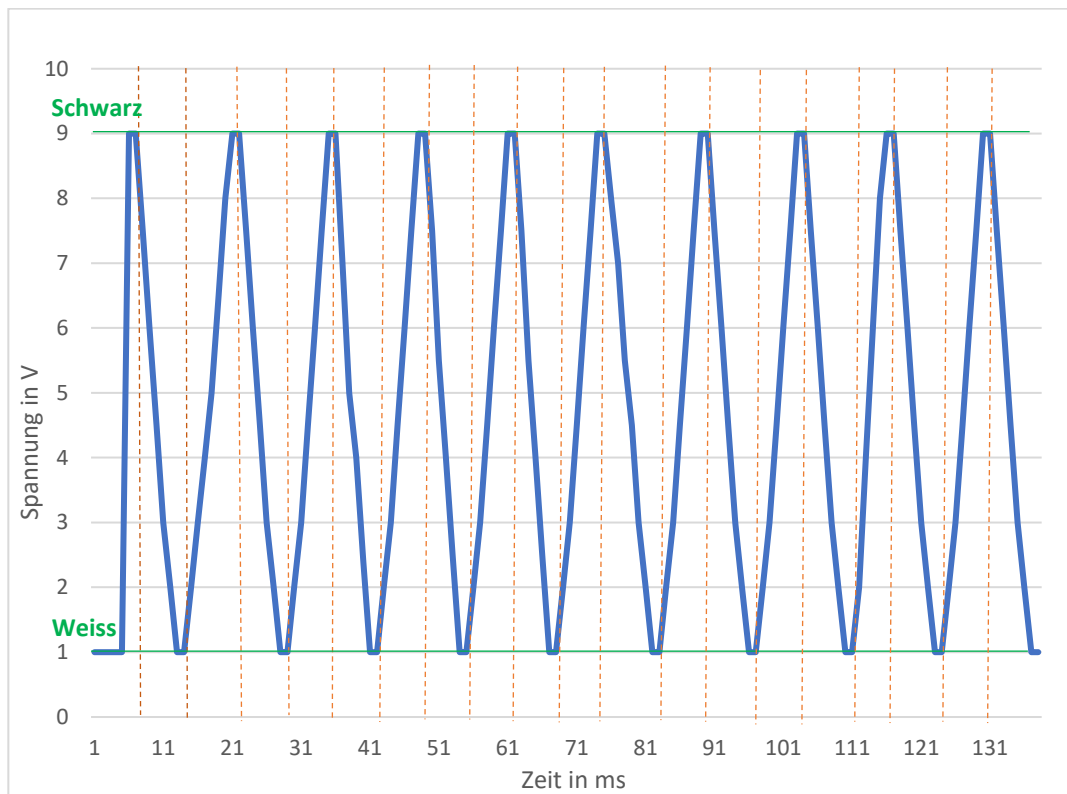


Abbildung 41: Reaktionszeit Versuch 3a
(eigene Grafik, 2024)

Im Diagramm (Abbildung 41) sieht man eine deutliche Verbesserung in der Reaktionszeit der LCD-Zelle und dies, obwohl die Spannung von 10V auf 9V reduziert wurde. Neu brauchte die Zelle nur noch 6.1ms, um von hell zu dunkel zu wechseln und 5.7ms, um von dunkel zu hell zu wechseln. Dementsprechend konnte eine durchschnittliche Reaktionszeit von 11.8 ms erreicht werden. Diese Ergebnisse lassen sich durch die Anpassung der Dicke von $5\mu\text{m}$ zu $4\mu\text{m}$ erklären. Auch dass die Zelle viel schneller auf das elektrische Feld anspricht, kann mit der neuen Dicke der LCD-Zelle erklärt werden.

Mit Batterie 8.4V:

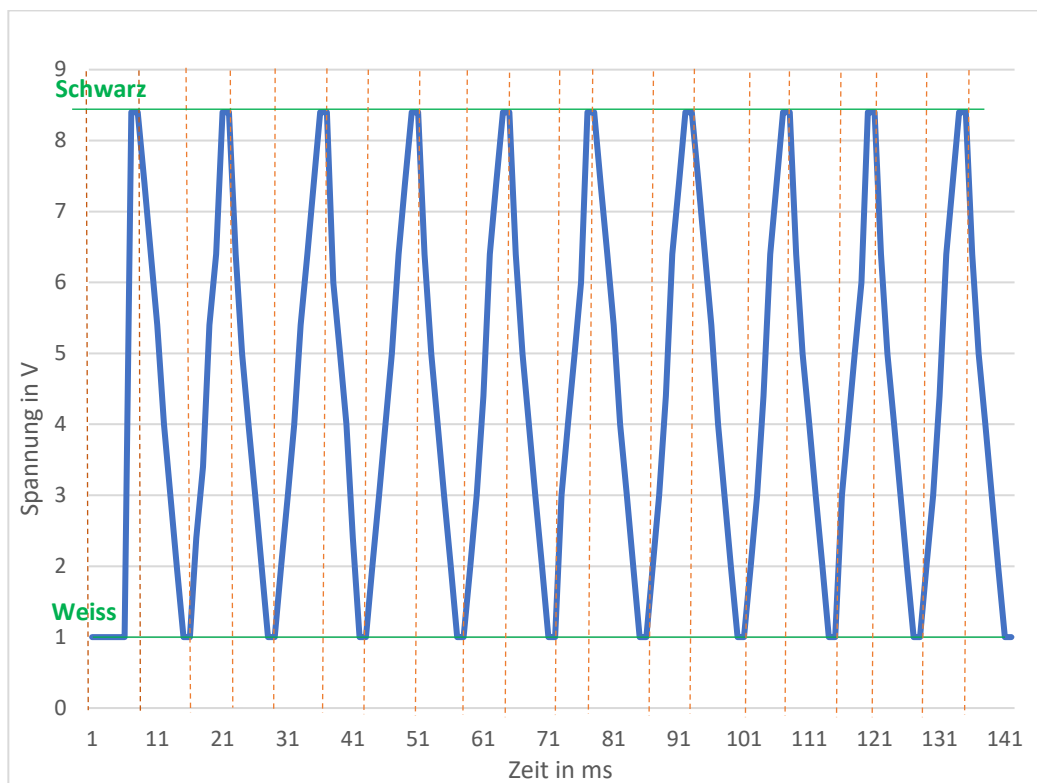


Abbildung 42: Reaktionszeit Versuch 3b
(eigene Grafik, 2024)

Als man dieselbe LCD-Zelle nun an eine Batterie anschloss (Abbildung 42), machte sich keine grosse Verzögerung in der Reaktionszeit bemerkbar. Dies, obwohl die Spannung auf 8.4V reduziert wurde. Jedoch fand dennoch eine Verlangsamung der Farbwechsel statt. Im Durchschnitt konnten Werte von 6ms für den Farbwechsel von weiss zu schwarz erzielt werden und für schwarz zu weiss 6.2ms, was einer Reaktionszeit von 12.2ms entspricht.

Die LCD-Zelle wurde im Labor nochmals an den Generator angeschlossen und deren Funktionalität wurde unter niedrigerer Spannung getestet. Doch bereits ab 8V hatte man eine Verminderung in der Ausrichtung der Moleküle gesehen. Es konnte kein Schwarz beziehungsweise kein dunkles Grau mehr erreicht werden.

Dieser Versuch zeigte, dass man mittels höherer Spannung als nötig wäre, die Moleküle zu einer schnelleren Ausrichtung forcieren kann. Man nennt dies auch Overdrive Technik.

8.1.4 Versuch 4

Da dieser Versuch abgebrochen werden musste, konnten auch hier leider keine Messungen bezüglich der Reaktionszeit vorgenommen werden.

8.1.5 Vergleich

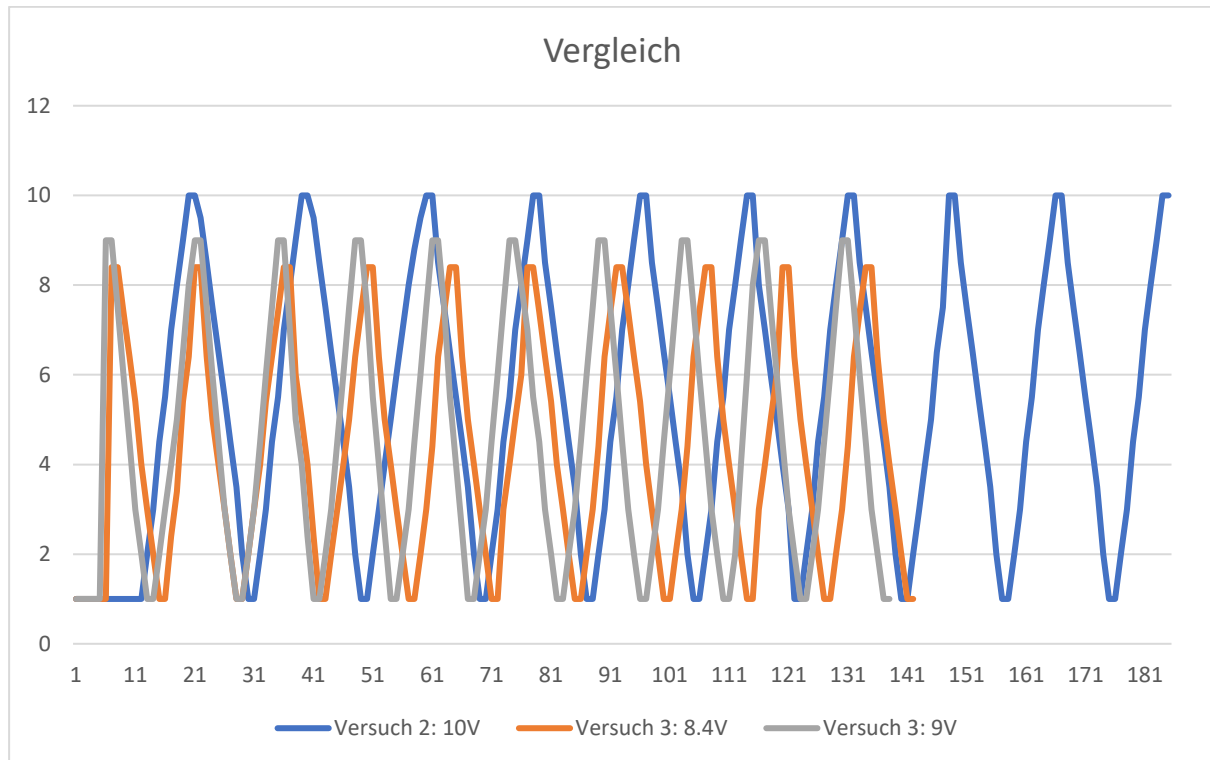


Abbildung 43: Reaktionszeiten im Vergleich
(eigene Grafik, 2024)

Zum Schluss wurde noch ein Vergleich zwischen den Versuchen gezogen. Insgesamt wurden die Zellen alle während zwanzig Farbwechseln beobachtet. Anschliessend legte man die Graphen der Abbildungen 40, 41 und 42 übereinander, um die Fortschritte zu visualisieren. Es ist klar zu sehen, dass sich die Zellen zwischen Versuch zwei und drei in ihrer Reaktionszeit massiv gesteigert haben. Während die LCD-Zelle des zweiten Versuches 181ms für die 20 grau zu grau Wechsel benötigte, konnte die LCD-Zelle aus Versuch drei dies innerhalb 139ms mittels Overdrive Technik erreichen und innerhalb 143ms unter Normalbedingungen. Mit Reaktionszeiten von 11.8ms und 12.2ms konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Denn heutige LED-Displays weisen meist eine Reaktionszeit von etwa 10ms auf. Doch für

Computerspiele bräuchte man hingegen eine noch tiefere Reaktionszeit von etwa 5ms, um Ghosting-Effekte zu vermeiden.⁸⁰

8.2 Diskussion

8.2.1 Beantwortung der Leitfragen

Die zentrale Frage dieser Arbeit lautete, was eine LCD-Zelle überhaupt ist und wie sie aufgebaut ist, was Flüssigkristalle sind und wofür deren Eigenschaften in diesem Kontext gebraucht werden können?

Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen, wurde sich mittels Fachliteratur ein Wissen über die spezielle Phase der Materie erarbeitet. Basierend auf einer Analyse der Mesophasen und der verschiedenen Arten von Flüssigkristallen konnte ermittelt werden, wieso genau kalamatische Flüssigkristallmoleküle in der nematischen Phase für eine LCD-Zelle verwendet werden. Zudem konnte durch Grundlagen in der Optik verstanden werden, wie man mit Hilfe von Polarisationsfiltern und der Erzeugung eines elektrischen Feldes die Stäbchenmoleküle gezielt ausrichten kann, so dass eine Lichtundurchlässigkeit erzielt wird.

Anhand des eigenständigen Baus einer LCD-Zelle, die durch eine Batterie betrieben wurde, konnte deren Aufbau und Funktionsweise nicht nur in der Theorie verstanden, sondern auch in der Praxis angewendet werden. Durch die Versuche konnte man zeigen, dass die Realisierung des Baus einer mit Batterie funktionierenden LCD-Zelle möglich ist. Es konnten klare Unterschiede von hell zu dunkel ausgemacht werden. Die Ausrichtung der Flüssigkristalle konnte demnach gezielt gesteuert werden, so dass die Lichtdurchlässigkeit beeinflusst werden konnte. Ebenfalls beim Ausmessen der Reaktionszeiten konnte man gute Ergebnisse erzielen.

Auch das Geheimnis des "Kindheitsfernsehers" konnte gelüftet werden, jedoch nur in der Theorie, da das Konstruieren eines ganzen Displays den Rahmen der Maturaarbeit gesprengt hätte. Dafür fehlten nicht nur Utensilien, sondern auch fundamentale Kenntnisse im Bereich der Elektrotechnik, die innerhalb dieser Zeit nicht erlernt werden konnten.

⁸⁰ (Turn On, 2024).

8.2.2 Methodenanalyse

Allgemein lässt sich sagen, dass man beim praktischen Teil anfangs auf viele Hindernisse gestossen ist, welche man hätte vermeiden können, wäre von Anfang an ein tieferes Fachwissen vorhanden gewesen. Da aber der erste Versuch bereits in den Sommerferien durchgeführt wurde, war die Vorbereitungszeit nur begrenzt.

Bei den weiteren Versuchen, welche in den Herbstferien stattgefunden haben, war genügend Zeit vorhanden. Es wurde ein Fachwissen zur speziellen Phase der Materie und zur LCD-Technologie erworben, und man konnte so gezielt gegen vorherige Fehler vorgehen. Diese Methode bewährte sich.

Durch den Prozess wurde viel gelernt, so dass man auch erfreuliche Ergebnisse erzielen konnte. Es stellte sich heraus, dass man mit einer möglichst dünnen LCD-Zelle mit den 5CB Flüssigkristallen die besten Resultate erhielt. Sie war die einzige Zelle, die mit dem Generator und einer Batterie betrieben werden konnte. Auch anhand der Messungen konnte man Aussagen über die Funktionalität der Zellen treffen.

Da die Messungen aber von zu Hause aus gemacht werden mussten, konnten die Übergangsgrautöne und deren Spannung leider nicht exakt gemessen werden. Dies lag daran, dass mein Betreuer an der ETH nicht noch mehr Zeit aufwenden konnte. In weiteren Versuchen hätte man dies sicherlich verbessern können. Man konnte eine durchschnittliche Reaktionszeit von 12.1ms von grau zu grau erzielen, mittels Overdrive Technik sogar Reaktionszeiten von 11.8ms. In weiteren Versuchen hätte man sicherlich die Zeiten noch weiter optimieren können, indem man zum Beispiel die Zelle noch dünner gemacht hätte. Des weiteren hätte man die LCD-Zellen über längere Zeit beobachten können, um noch präzisere Werte zu erhalten.

8.2.3 Ausblick in die Zukunft

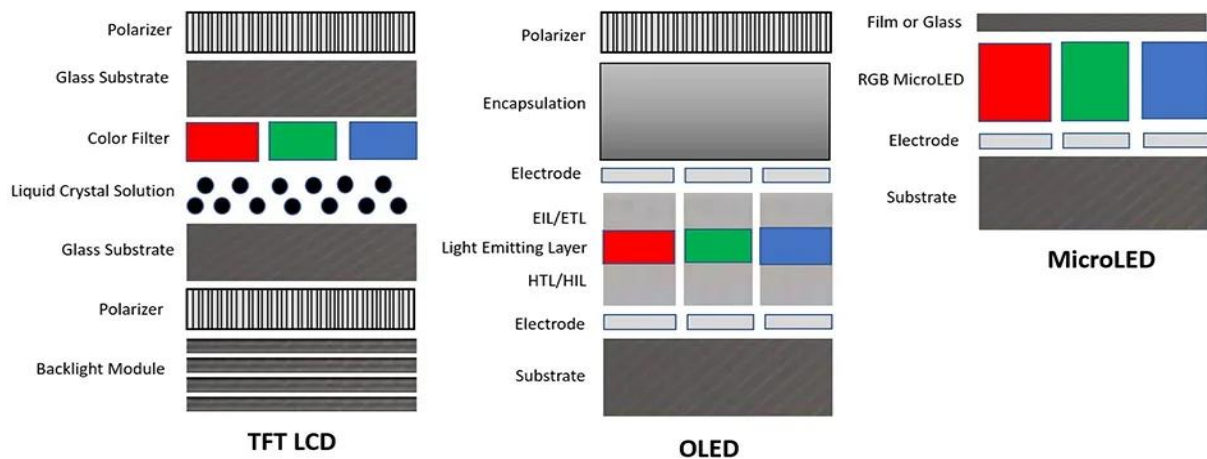


Abbildung 44: TFT LCD, OLED und MicroLED
(Rajawat , 2023)

Die LCD-Technologie dominierte über lange Zeit den Markt, doch in den letzten Jahren wurde ihr grösster Konkurrent immer stärker. Es handelt sich um die OLED-Technologie. Gegenüber des LED-Displays haben die OLED-Displays einen grossen Vorteil, denn sie benötigen keine Hintergrundbeleuchtung, da die organischen Moleküle unter Stromzufuhr von selbst aufleuchten. So können nicht nur dünnere Bildschirme gebaut werden, sondern die Moleküle ermöglichen auch das Erstellen eines wirklichen Schwarzes, da jedes Molekül individuell betätigt wird. OLED-Displays haben auch eine schnellere Reaktionszeit und einen höheren Kontrast. Im Vergleich zur LCD-Technologie ist die OLED-Technologie aber wesentlich teurer und weniger lange haltbar. Dennoch verwendet man heute für Handys, Tablets und hochwertige Fernseher beinahe ausschliesslich OLEDs. Momentan ist die Entwicklung einer weiteren neuen Technologie im Gange. Es handelt sich um sogenannte MicroLEDs. Wie uns der Name schon verrät, handelt es sich hier um winzige LEDs, welche alle einzeln angesteuert werden. Dadurch erhält man einen exakten Schwarzpunkt mit einem hohen Kontrast. Der Vorteil zu OLED ist, dass sie nicht nur langlebiger sind, sondern es auch ermöglichen eine noch dünnere Anzeige zu kreieren. Sie besteht nur aus vier Schichten. Dies klingt nach einer idealen Lösung, doch der Kostenfaktor macht momentan dieser Technologie einen Strich durch die Rechnung. Zukünftig ist dennoch anzunehmen, dass die LCD-Technologie vorerst nicht so schnell verschwinden wird, da sie günstig ist und in Bereichen, in denen keine extrem schnelle Reaktionszeit gefordert wird, sich als völlig ausreichend zeigt.⁸¹

⁸¹ (Rajawat , 2023).

9 Schlusswort

9.1 Persönlicher Kommentar

Durch diese Arbeit gelang es mir einen ersten Einblick in das Wissenschaftliche Schreiben zu bekommen. Ich weiss auch die vielen neuen Erfahrungen im Laboralltag zu schätzen, welche mir eine grosse Freude bereiteten. Ich musste aber auch lernen, dass beim ersten Versuch nicht immer alles perfekt ausgeht. Dabei ist wichtig, dass man aus seinen Fehlern lernt und das Ganze als einen Lernprozess wahrnimmt.

9.2 Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank an all diejenigen aussprechen, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben. Insbesondere möchte ich mich bei Dr. Prof. Lucio Isa der ETH bedanken, der als Abteilungsleiter des Labors für weiche Materialien und Grenzflächen tätig ist. Seine Empfehlung führte mich zu Herrn Zazzo, der sich im Rahmen seiner Doktorarbeit tief gehende Kenntnisse im Bereich der Flüssigkristalle erarbeitet hat. Ohne ihre Hilfe und ihre Bereitschaft mich beim Bau meiner LCD-Zelle zu unterstützen, wäre die Umsetzung meiner Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein herzlicher Dank geht auch an meine Betreuungsperson Ali Parsa, der mir stets Unterstützung gewährte und mir Mut zusprach, wenn es darum ging, mich mit den komplexen, aber äusserst faszinierenden Aspekten dieses Themas auseinanderzusetzen.

Die Zusammenarbeit mit diesen engagierten und kompetenten Personen hat meine Forschungsarbeit massgeblich beeinflusst, und ich bin dankbar für die wertvollen Erfahrungen, die ich sammeln konnte.

10 Glossar

- Bindungsorientierungsfernordnung:** Die Ordnung in einem Gitter (Elementarzelle) ist schichtübergreifend.
- Dielektrizitätskonstante:** Ist eine elektrische Feldkonstante, die angibt, wie schnell sich ein Material im Vakuum ausbreitet.⁸²
- Faden-/ Schlierentexturen:** Handelt es sich um eine Art Netz, welches Punkt und Liniendefekte mittels schwarzen Bändern, den Schlieren verbindet.⁸³
- Ghostingeffekt:** Wenn die Reaktionszeit zu langsam ist und sich deshalb eine schwache Version des Bildes wie ein Schleier über dem Bildschirm ausbreitet.
- Iminogruppe:** Ist eine funktionelle Gruppe mit einer C=N Bindung, die Reste R1, R2, R3 können beliebige organische Reste sein oder auch H-Atome.⁸⁴
- Parallelepiped:** Ist ein geometrischer Körper auch Spat genannt, der aus sechs Parallelogrammen besteht. Die sich gegenüberliegenden Flächen sind jeweils deckungsgleich.
- Permanenter Dipol:** Liegt dann vor, wenn die Ladungsschwerpunkte in einem Molekül nicht zusammenfallen und eine Elektronen negativitätsdifferenz von mindestens 0.4 gegeben ist.
- Phasenverschiebung:** Sinusförmige Schwingungen, die sich in ihren Phasenwinkeln unterscheiden das heißt sie schneiden die x-Achse zu verschiedenen Zeitpunkten.⁸⁵

⁸² (LEXIKON DER PHYSIK, Dielektrizitätskonstante, 1998).

⁸³ (Willig, Textur (Mesophase), 2023).

⁸⁴ (Willig, Imine, 2023).

⁸⁵ (Willig, Phasenverschiebung, 2023).

Polyimid:	Ist ein Polymer mit Imidgruppen. ⁸⁶
Orthogonal:	Senkrecht.
Sample and Hold Schaltung:	Das Abtast-Halte-Glied merkt sich den Wert der Eingang Spannung und hält diesen auch im ausgeschalteten Zustand.

⁸⁶ (S&P Global , 2022).

11 Eigenständigkeitserklärung

Ich Angelina Hauser, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle sinngemäss und wörtlich übernommenen Textstellen aus fremden Quellen wurden kenntlich gemacht. Ich nehme auch zur Kenntnis, dass meine Arbeit zur Überprüfung der korrekten und vollständigen Angabe der Quellen mithilfe einer Software (eines Plagiatserkennungstools) geprüft wird.

Datum:

Unterschrift:

12 Literaturverzeichnis

- Boyd, K. (2021). *Three Fundamental States of Matter Solid, Liquid, and Gases*. Technische Universität Hamburg: Medium.com.
- Brown, T., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M., & Stoltzfus, M. W. (2018). *Chemie studieren kompakt*. München: Pearson Studium.
- Chemie.de. (1997-2023). *Amphiphilie*. <https://www.chemie.de/lexikon/Amphiphilie.html>: Lumitos.
- Chemie.de. (1997-2023). *Chiralität*. <https://www.chemie.de/lexikon/Chiralität.html>: Lumitos.
- Chemie.de. (1997-2023). *Flüssigkristall*. <https://www.chemie.de/lexikon/Fl%C3%BCssigkristall.html>: Lumitos.
- Chemie.de. (1997-2023). *Polarisation*. <https://www.chemie.de/lexikon/Polarisation.html>: Lumitos.
- Dahman, Y. (2017). *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*. Toronto: Elsevier. Von [https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/lyotropic-liquid-crystal#:~:text=Lyotropic%20liquid%20crystal%20structures%3A%20\(A,\(D\)%20bicontinuuous%20cubic%20structure](https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/lyotropic-liquid-crystal#:~:text=Lyotropic%20liquid%20crystal%20structures%3A%20(A,(D)%20bicontinuuous%20cubic%20structure) abgerufen
- Dornik, R. (2005). *Projektionstechnik*. Digital Media For Artists - LCD-Projektor (ufg.ac.at): Digital Media for Artists.
- Embacher, F. (2013/2014). *Auf dem Weg vom Eis zum Wasserdampf*. <https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Splitter/VomEisZumWasserdampf/>: Fakultät für Physik der Universität Wien.
- Fendt, W. (2019). *Legendre-Polynome*. <https://www.walter-fendt.de/math/hm/legendre-polynome.pdf>.
- Geowissenschaften, F. f. (unbekannt). *Versuch O11: Polarisation*. O-11-AUF.pdf (uni-leipzig.de): Universität Leipzig.
- Gmelch, M., & Reineke, S. (2019). *Durchblick in Optik*. Heidelberg: Springer. Von <https://lehrbuch-physik.springer.com/glossar/wellenvektor> abgerufen
- Götz, S. (2018). *Temperaturabhängige optische Eigenschaften*. Hamburg: Technische Universität Hamburg. Von [57](https://bib-</p></div><div data-bbox=)

pubdb1.desy.de/record/414516/files/Masterarbeit%20Steffen%20G%C3%B6tz.pdf
abgerufen

Grefkes, D. (2017). *Experimentelle Analyse der Optimierungsmöglichkeiten eines RFID-Tunnels*. https://www.researchgate.net/publication/317718757_Otto-von-Guericke-Universitat_Magdeburg_Fakultat_fur_Elektrotechnik_und_Informationstechnik_Bachelorarbeit_Experimentelle_Analyse_der_Optimierungsmoglichkeiten_eines_RFID-Tunnels: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Gurke, I. (1999). *Smektische Thermotrope Hauptkettenpolyesterimide*. Hamburg, Germany: Institut für Makromolekulare und Technische Chemie, Universität Hamburg. Von <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/14/1/Dissertation.pdf> abgerufen

Henan Daken Chemical Co., L. (2022). *Flüssigkristallpolymer: 6 Dinge, Die Sie Wissen Sollten*. <https://www.dakenchem.com/de/fluessigkristallpolymer-6-dinge-die-sie-wissen-sollten/>: Henan Daken Chemical Co., Ltd.

Hird Michael, C. P. (1997). *Introduction to Liquid Crystals, Chemistry and Physics*. London: Taylor & Francis Group.
doi:<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315272801/introduction-liquid-crystals-peter-collings-george-gray-john-goodby-michael-hird>

LEIFIPhysik. (2023). *Funktion von LCD-Displays*. <https://www.leifiphysik.de/optik/polarisation/ausblick/funktion-von-lcd-displays>: Joachim Herz Stiftung.

LEIFIPhysik. (2023). *Herleitung der Wellenfunktion*. <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-wellen/grundwissen/herleitung-der-wellenfunktion>: Joachim Herz Stiftung.

Lernattack.de. (unbekannt). *Brechung und Brechungsindex*. <https://lernattack.de/schuelerlexikon/physik/brechung-und-brechungsindex>: Duden.

LEXIKON DER PHYSIK. (1998). *Cholesterische Phase*. [https://www.spektrum.de/lexikon/physik/cholesterische-phase/2383#:~:text=cholesterische%20Phase%2C%20eine%20Mesophase%20\(d.h.,Beispiele%20f%C3%BCr%20diese%20Phase%20waren.](https://www.spektrum.de/lexikon/physik/cholesterische-phase/2383#:~:text=cholesterische%20Phase%2C%20eine%20Mesophase%20(d.h.,Beispiele%20f%C3%BCr%20diese%20Phase%20waren.): Spektrum Akademischer Verlag. Von LEXIKON DER PHYSIK. abgerufen

- LEXIKON DER PHYSIK. (1998). *Dielektrizitätskonstante*.
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dielektrizitaetskonstante/3040>: Spektrum Akademischer Verlag.
- LEXIKON DER PHYSIK. (1998). *Legendre-Polynome*.
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/legendre-polynome/8912>: Spektrum Akademischer Verlag.
- Limbach, D. (2018). *Modifikation der Struktur und Peripherie von Tristriazolotriazinen - neuartige diskotische Flüssigkristalle*. <https://openscience.ub.uni-mainz.de/bitstream/20.500.12030/2340/1/100003117.pdf>: Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Lueder, E. (2010). *Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Metallurgy, D. o. (2004-2023). *Liquid Crystals*.
https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/liquid_crystals/intro.php#:~:text=Liquid%20crystal%20molecules%20are%20typically,known%20as%20calamitic%20liquid%20crystals: University of Cambridge.
- Mietke, D. (2002-2023). *LCD-TFT-Flachbildschirmtechnik*.
<https://www.elektroniktutor.de/geraetetechnik/tftlcd.html>: Informations- und Kommunikationstechnik.
- NDR. (2023). *Bewegte Bilder: Die Geschichte des Fernsehens*.
<https://www.ndr.de/geschichte/schauplaetze/Bewegte-Bilder-Die-Geschichte-des-Fernsehens,fernsehen240.html>: NDR.
- Noack, K. (2009). *Sinus und Kosinus am Einheitskreis*.
<https://www.matheretter.de/wiki/einheitskreis-sinus-kosinus>: Matheretter.
- Rajawat , D. (2023). *What is a MicroLED Display? What makes them Superior to OLED and Mini LED Screens*. <https://www.smartprix.com/bytes/micro-led-vs-oled-and-mini-led/>: Smartprix.
- RCT Reichelt Chemietechnik GmbH, C. (unbekannt). *Flüssigkristalline Polymere – Eigenschaften und Verwendung*. <https://www.rct-online.de/magazin/fluessigkristalline-polymere/>: Reichelt Chemietechnik.

- S&P Global . (2022). *Polyimides and Imide Polymers*.
<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/polyimides-and-imide-chemical-economics-handbook.html>: S&P Global Inc.
- Schmidt, M. (1999). *Allgemeine Informationen zu Mesophasen (Flüssigkristallen)*.
https://cumschmidt.de/beschreibung_fluessigkristalle.htm: cumschmidt.
- Studyflix. (2023). *Brechungsindex*.
<https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/brechungsindex-2343>: Studyflix GmbH.
- StudySmarter. (2023). *Phasenverschiebung*.
<https://www.studysmarter.de/schule/physik/mechanik/phasenverschiebung/>: StudySmarter GmbH.
- StudySmarter. (2023). *Polarisation*.
<https://www.studysmarter.de/schule/physik/optik/polarisation/>: StudySmarter GmbH.
- The LibreTexts. (unbekannt). *Conductors in Electrostatic Equilibrium*.
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_\(OpenStax\)/06%3A_Gauss's_Law/6.05%3A_Conductors_in_Electrostatic_Equilibrium](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_II_-_Thermodynamics_Electricity_and_Magnetism_(OpenStax)/06%3A_Gauss's_Law/6.05%3A_Conductors_in_Electrostatic_Equilibrium): NICE CXone Expert.
- Turn On. (2024). *Reaktionszeit bei Fernseher und Monitor: Was besagen die Werte?*
 Reaktionszeit bei Fernseher und Monitor: Was besagen die Werte? (turn-on.de): MMS E-Commerce GmbH.
- TV, L. (2023). *Fernseher*. <https://www.wertgarantie.de/lexikon/tv/fernseher>.
- von Ossietzky, C. (2023). *Polarisation von Licht*.
<https://uol.de/f/5/inst/physik/ag/physikpraktika/download/GPR/pdf/Polarisation.pdf>: Universität Oldenburg - Fakultät V- Institut für Physik.
- Willig, H.-P. (2023). *Imine*. <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Imine>: chemie-schule.de.
- Willig, H.-P. (2023). *Phasenverschiebung*. <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Phasenverschiebung>: cosmos-indirekt.de.
- Willig, H.-P. (2023). *Textur (Mesophase)*. [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Textur_\(Mesophase\)](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Textur_(Mesophase)): chemie-schule.de.

Willig, H.-P. (2023). Wellenzahl. Wellenzahl – Physik-Schule (cosmos-indirekt.de): cosmos-indirekt.de.

Wurzbach, I. (2021). Höhergeordnete Phasen smektischer Flüssigkristalle: Struktur und Ladungstrans. Stuttgart: Institut für Physikalische Chemie der Universität Stuttgart. Von https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/11584/1/Dissertation_IrisWurzbach.pdf abgerufen

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0: Titelbild (Maasen, 2018)	9
Abbildung 1: Phasendiagramm von Wasser (Embacher, 2013/2014)	8
Abbildung 2: Flüssigkeit im Teilchenmodell	9
Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Elementarzelle (Brown, et al., 2018) S.505	10
Abbildung 4: Zweidimensionale Gitterformen der Kristalle (Brown, et al., 2018) S.506.....	11
Abbildung 5: Molekulare Anordnung in einem nematischen Flüssigkristall (Hird Michael, 1997) S.2 .	13
Abbildung 6: Ordnungsparameter S (Hird Michael, 1997) S.2	13
Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des Parameters S, wobei T_c der Temperatur des Phasenübergangs des Flüssigkristalls zur flüssigen Phase entspricht. (Hird Michael, 1997) S.3	14
Abbildung 8: Typisches calamatisches Flüssigkristallmolekül (eigene Darstellung, 2023).....	15
Abbildung 9: Molekülaufbau von Benzol, Triphenylen & Truxen (eigene Darstellung,2023).....	16
Abbildung 10: Diskotisches Flüssigkristallmolekül mit Triphenylen im Kern (eigene Darstellung, 2023)	16
Abbildung 11: Lyotropische Flüssigkristalle: (a) Seife; (b) Phospholipid c (Hird Michael, 1997) S.7	17
Abbildung 12: Mizelle; Vesikel (Hird Michael, 1997) S.8	18
Abbildung 13: Molekulare Ordnung in nematische, smektisch und cholesterische flüssigkristalline Phasen (Brown, et al., 2018) S.493.....	19
Abbildung 14: Ausrichtung der Moleküle in der cholesterischen Phase, wobei p die Steigung der Spirale ist, (LEXIKON DER PHYSIK, Cholesterische Phase, 1998)	22
Abbildung 15: Wellenvektor; Winkelfrequenz (Hird Michael, 1997) S.228.....	23
Abbildung 16: (a) elektrisches Feld; (b) magnetisches Feld (Hird Michael, 1997) S.229	24
Abbildung 17: Richtungsvektor E_0 (Hird Michael, 1997) S.230.....	24
Abbildung 18: Formel zur Winkelberechnung (Hird Michael, 1997) S.229	24
Abbildung 19: Allgemeine elektromagnetische Welle mit x und y Komponente (Hird Michael, 1997) S.230.....	25
Abbildung 20: Aufbau einer linear polarisierten Welle (Grefkes, 2017)	26
Abbildung 21: (a) links zirkular polarisierte (b) rechts zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen (Hird Michael, 1997) S.231	26
Abbildung 22: Komponenten eines rechts zirkular polarisierten elektrischen Feldvektors (Hird Michael, 1997) S.230.....	27
Abbildung 23: Komponenten eines links zirkular polarisierten elektrischen Feldvektors (Hird Michael, 1997) S.231.....	27
Abbildung 24: Elliptisch polarisierte elektromagnetische Welle (Hird Michael, 1997) S.232	28

Abbildung 25: Geschwindigkeit v und Wellenlänge (Hird Michael, 1997) S.233	28
Abbildung 26: Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex n (Hird Michael, 1997) S.235	29
Abbildung 27: Geschwindigkeit v und Wellenlänge (Lernattack.de, unbekannt)	29
Abbildung 28: Formel des Brechungsgesetzes (Lernattack.de, unbekannt)	30
Abbildung 29: Zusammensetzung einer LCD-Zelle (Dornik, 2005).....	31
Abbildung 30: Neigungswinkel (Lueder, 2010) S.14	32
Abbildung 31: spin coating Maschine (ETH-Labor); (eigenes Foto, 2023).....	35
Abbildung 32: Reibmaschine (ETH-Labor) (eigenes Foto, 2023)	37
Abbildung 33: 5CB Flüssigkristall (eigene Darstellung, 2023)	38
Abbildung 34: 8CB Flüssigkristall (eigene Darstellung, 2023)	38
Abbildung 35: LCD-Zelle auf Heizplatte (ETH-Labor) (eigenes Foto, 2023)	41
Abbildung 36: Moleküle der Flüssigkristallschicht richten sich aus aufgrund des erzeugten elektrischen Feldes (eigenes Foto, 2023).....	42
Abbildung 37: Moleküle sind nicht ausgerichtet, da kein elektrisches Feld vorhanden ist (eigenes Foto, 2023).....	42
Abbildung 38: Elektrische Feldstärke in einem Kondensator (The LibreTexts, unbekannt)	43
Abbildung 39: Links sind die Moleküle nicht ausgerichtet, rechts sind die Moleküle ausgerichtet (eigenes Foto, 2023)	43
Abbildung 40: Reaktionszeit Versuch 2 (eigene Grafik, 2024).....	46
Abbildung 41: Reaktionszeit Versuch 3a (eigene Grafik, 2024)	47
Abbildung 42: Reaktionszeit Versuch 3b (eigene Grafik, 2024).....	48
Abbildung 43: Reaktionszeiten im Vergleich (eigene Grafik, 2024).....	49
Abbildung 44: TFT LCD, OLED und MicroLED (Rajawat , 2023)	52
Abbildung 45: Heizplatte	64
Abbildung 46: Multimeter	64
Abbildung 47: ITO-Präparate	64
Abbildung 48: ITO-Präparate nach dem Rubbing.....	65
Abbildung 49: LCD-Zelle	65
Abbildung 50: Heizplatte für Substrat	65
Abbildung 51: LCD-Zelle unter Lichtmikroskop	66
Abbildung 52: LCD-Zelle angeschlossen am Wellengenerator	66
Abbildung 53: Metallevaporator	66

14 Anhang

14.1 Unverwendete Bilder

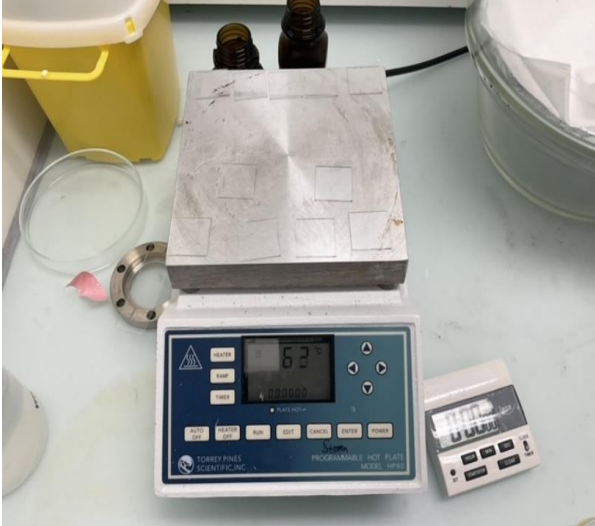


Abbildung 45: Heizplatte

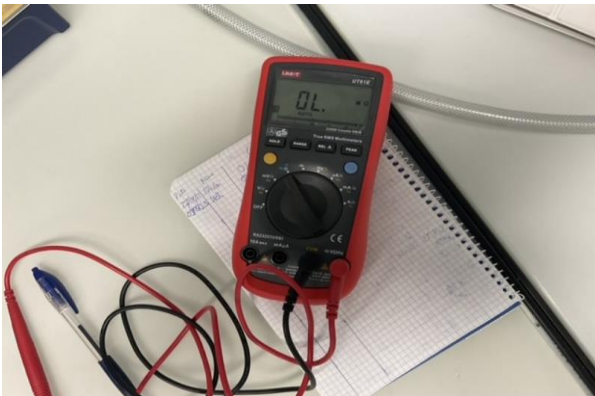


Abbildung 46: Multimeter

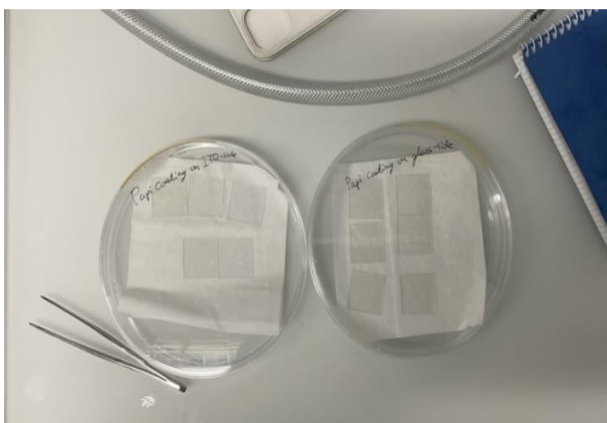


Abbildung 47: ITO-Präparate

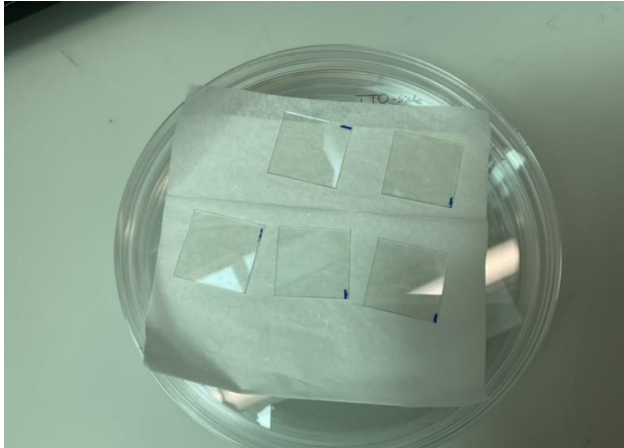


Abbildung 48: ITO-Präparate nach dem Rubbing

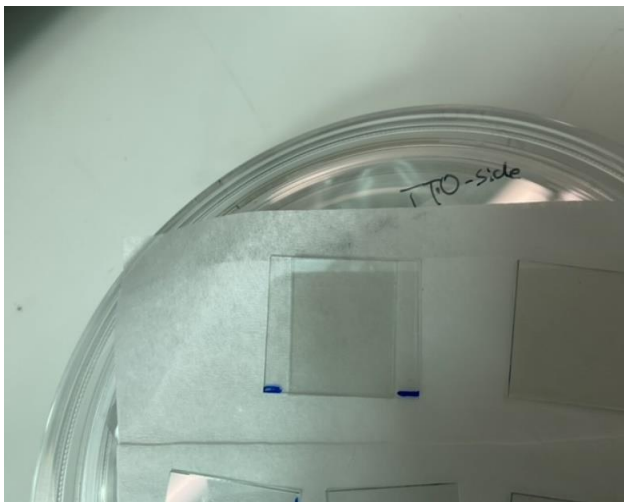


Abbildung 49: LCD-Zelle

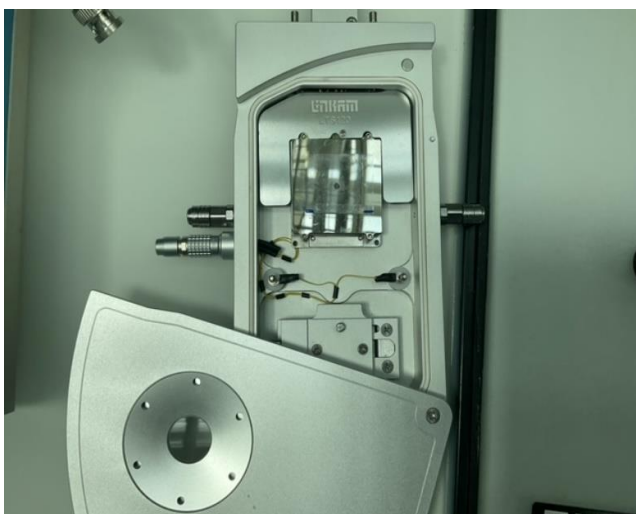


Abbildung 50: Heizplatte für Substrat



Abbildung 51: LCD-Zelle unter Lichtmikroskop



Abbildung 52: LCD-Zelle angeschlossen am Wellengenerator



Abbildung 53: Metallevaporator