
Fachhochschule Aachen
Fachbereich
Chemie und Biotechnologie
Studiengang Angewandte Chemie

Funktionsweise und Bau einer OLED

Bachelorarbeit von Jiawen Xiong

Matr.-Nr.: 821883

Jülich, im August 2012

Erklärung

Diese Arbeit ist von mir selbständig angefertigt und verfasst.
Es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und
Hilfsmittel benutzt worden.

Jiawen Xiong

Unterschrift:

Diese Arbeit wurde betreut von:

1. Prüfer: Prof. Dr. Günter Jakob Lauth
2. Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Franz Prielmeier



Danksagung:

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Günter Jakob Lauth ganz herzlich bedanken, nicht nur für die Themenstellung dieses interessanten und hochaktuellen Themas, sondern auch für seine intensive Betreuung und starke Unterstützung, sowie seine Hilfsbereitschaft bei der Bewältigung aller Probleme.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Franz Prielmeier für die Betreuung und die aufklärenden Ratschläge. Bei Dipl.-Ing. Ulrike Goergens bedanke ich mich für die Überlassung eines Labor- und Büroplatzes und die Unterstützung bei der Auswahl der Chemikalien und Geräte.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern an der Fachhochschule für ihre Hilfsbereitschaft während meiner Examenszeit.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, dafür, dass sie mir ein Studium in Deutschland ermöglicht hat.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	6
Einleitung	6
1.1 Motivation.....	7
1.2 Ziele der Arbeit.....	9
Kapitel 2	11
Grundlagen	11
2.1 Organische molekulare Halbleiter.....	12
2.2 Organische Leuchtdioden (OLEDs).....	17
2.2.1 Die Schichtenfolge in den OLEDs.....	17
2.2.2 Funktionsmechanismen einer OLED.....	18
2.2.3 Moderne OLEDs.....	25
Kapitel 3	31
Experimenteller Teil	31
3.1 Chemikalien und Geräte.....	32
3.2 Bau einer low-Cost OLED.....	36
3.3 Meßsystem zur Charakterisierung der OLEDs.....	41
3.3.1 Strom-Spannungs-Charakterisierung (IV).....	41
3.3.2 Lebensdaueruntersuchung.....	46
Kapitel 4	49
Zusammenfassung und Ausblick	49
Literatur- und Quellenverzeichnis	50
Abbildungsverzeichnis	53
Verzeichnis der Abkürzungen	55
Verzeichnis der Symbole	56

Kapitel 1

Einleitung

Organische Halbleiterbauelemente bilden eine neue Klasse optoelektronischer Bauteile mit einem sehr hohen Zukunftspotential. In den folgenden Kapiteln werden die Motivation der Forschung vorgestellt und die Ziele der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation

Organische Leuchtdioden (OLEDs) sind eine Klasse von Leuchtmitteln mit faszinierenden Eigenschaften. Momentan befinden sie sich noch in der weiteren Entwicklung. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden sie in den nächsten Jahren einen großen Marktanteil optoelektronischer Bauteile einnehmen. OLEDs sind als Zukunftstechnologie in der Beleuchtungs- und Displaybranche anzusehen. Heute werden OLEDs bereits in vielen Teilen der Unterhaltungselektronik, in MP3-Playern und mobiler Telekommunikation als kleine Displays eingesetzt. Es werden auch Displaygrößen von über 20 Zoll realisiert. Die ersten marktreifen OLED-TVs werden schon auf Messen vorgestellt und verkauft.

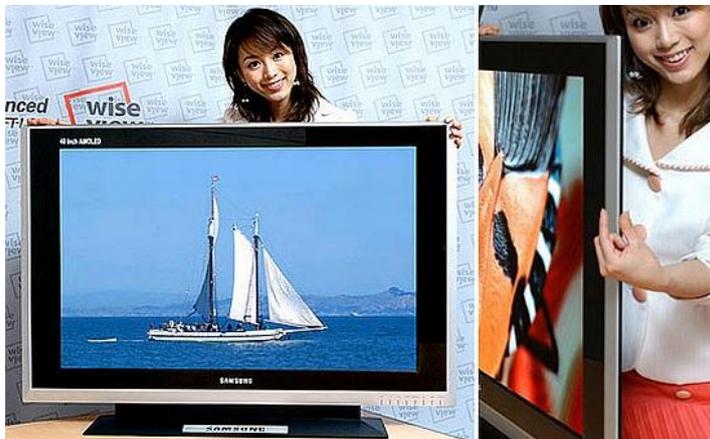


Abbildung 1: Prototypen von 40-Zoll-OLED-Fernsehern (730 x 920mm) von Samsung [1]

Im Jahre 1960 wurde erstmals die Emission von Licht an organischen Materialien entdeckt. Im Jahre 1987 wurde die prinzipielle Funktionalität von organischen Leuchtdioden von C.W.Tang und Van Slyke von der Firma Kodak zum ersten Mal vorgestellt. ^[2] Seitdem hat sich eine rasante Entwicklung im Bereich der organischen Materialien vollzogen.

1. Einleitung

Die traditionelle Technologie wie Flüssigkristallanzeigen (LCDs) sind vorherrschend im Einsatz von Bildschirmen. LCDs sind eine Alternative zu organischen Materialien mit fluoreszenten und phosphoreszenten Eigenschaften. OLEDs haben aber eine Vielzahl von Vorteilen im Vergleich zu LCDs. OLEDs werden z.B. einfacher und kostengünstiger hergestellt und brauchen geringere Energie. Die großflächigen OLEDs können auf flexiblen Substraten realisierbar eingesetzt werden, z.B. auf Kunststofffolie. Sie haben geringe Ansprechzeiten und hohen Kontrast ($\approx 500:1$) und sind selbstleuchtend.^[3] Sie benötigen keinerlei Hintergrundbeleuchtung, wodurch geringe Bauteildicke und hohe Blickwinkel bis 160° möglich werden. Die Betriebsspannung liegt um 5V.^[4] Der Strombedarf ist geringer als bei LEDs. Weiterhin können die OLEDs weißes Licht emittieren. Diese Eigenschaft wird in den OLED-Beleuchtungstechniken große Anwendung finden.^[5]

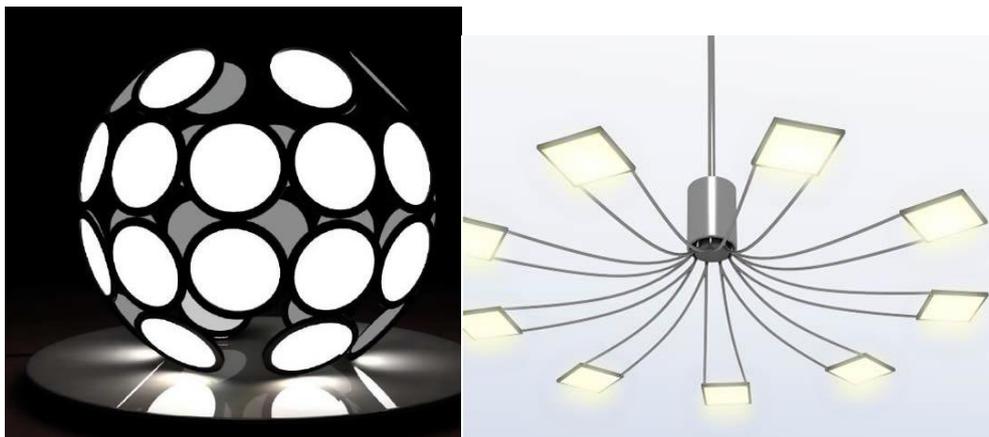


Abbildung 2: OLED-Lampe^[6]

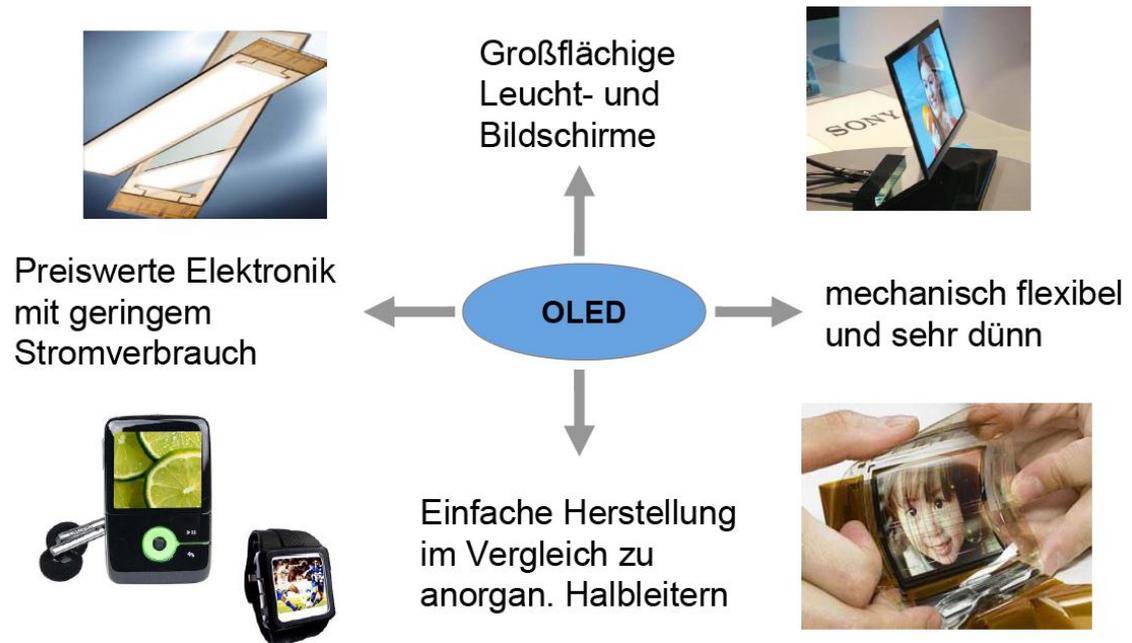


Abbildung 3: Warum OLEDs? [1]

Neben den vielen Vorteilen gibt es noch einige Nachteile. Ein Hauptproblem ist die Lebensdauer der OLEDs, die durch unterschiedliche Alterung der verwendeten Materialien und der UV-Empfindlichkeit beeinflusst werden kann. Aus diesem Grund sollen die Technologien verbessert werden, um effizientere OLEDs herzustellen.

1.2 Ziele der Arbeit

OLEDs basieren auf Kohlenwasserstoffmolekülen mit konjugierten Doppelbindungen. Ziel dieser Arbeit ist es, mithilfe von Superyellow® als Vertreter von leitfähigen, π -konjugierten Polymeren, das Funktionsprinzip eines OLEDs zu verstehen. Weiter wird mit dem ITO-Glas über das Prinzip der Elektrolumineszenz in konjugierten Polymeren ein low-cost OLED aufgebaut.

1. Einleitung

In dieser Arbeit wird die Charakterisierung sich vorrangig auf die elektrischen und hellen Parameter der OLEDs beziehen. Schließlich werden die Auswirkungen eines während der Synthese des Polymers entstehenden Defekts auf die Lebensdauer der Leuchtdioden aufgeklärt und ein Methode zur Vermeidung des Defekts gezeigt.

Kapitel 2

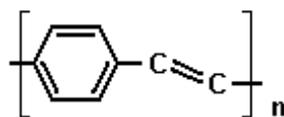
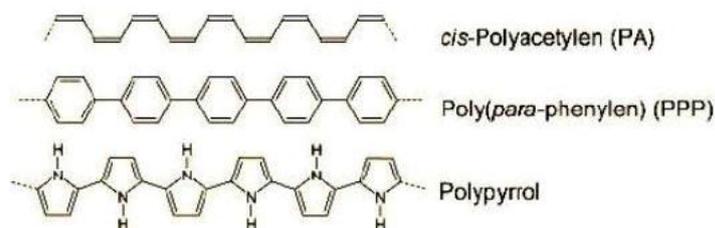
Grundlagen

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften organischer molekularer Halbleiter, sowie die chemischen und physikalischen Eigenschaften behandelt. Der Schwerpunkt liegt auf der Diskussion organischer Leuchtdioden und dem elektronischen Ladungstransport durch organische Halbleiter. Weiter wird auf die Funktionsmechanismen, Funktionsschichten und Materialien für OLEDs eingegangen. Über die modernen OLED -Typen wird ein kurzer Überblick gegeben.

2.1 Organische molekulare Halbleiter

Es gibt viele verschiedene organische Verbindungen, die halbleitende Eigenschaften haben und als Halbleiter (HL) bezeichnet werden. Bestimmte organische molekulare Halbleiter können beim Anlegen einer elektrischen Spannung Licht emittieren.

Organische Halbleiter sind Kohlenwasserstoffverbindungen, in denen konjugierte Doppelbindungen vorliegen, die sich durch abwechselnde Einfach- und Doppelbindungen auszeichnen. Diese konjugierten Kohlenstoffbindungen sind zuständig für die halbleitenden Eigenschaften dieser organischen Materialien. ^[7,8] Sie entstehen durch die sp^2 -Hybridisierung der Valenzorbitale der beteiligten Kohlenstoffe.



PPV

Poly(p-phenylen-vinylen)

Abbildung 4: Beispiele für konjugierte Polymere ^[1, 5.8]

Eine sp^2 -Hybridisierung ist die Überlagerung der s -, p_x - und p_y -Atom-Orbitale in der Form , wie es in Abbildung 2.2 zu sehen ist.

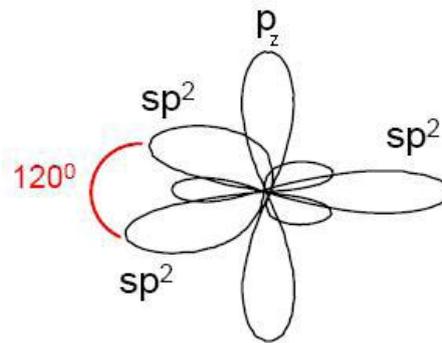


Abbildung 5: sp^2 -hybridisiertes Atom [1,5.5]

Die drei entstandenen sp^2 -Hybridorbitale, die um 120° zueinander angeordnet sind, bilden eine Ebene. Das p_z -Orbital steht senkrecht auf der Ebene des sp^2 -Hybridorbitals. Wenn sich sp^2 -hybridisierte Atome, wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, überlagern, kommt es zu einer sogenannten Doppelbindung. Das einfachste Beispiel für eine Doppelbindung ist das Ethenmolekül (s. Abb. 6), das zwei sp^2 -hybridisierte Kohlenstoffatome enthält. Auf der Ebene der sp^2 -Orbitale befindet sich die σ -Bindung, die aus der Überlappung zweier sp^2 -Hybrid-Orbitale gebildet wird. Oberhalb und unterhalb der Ebene der sp^2 -Orbitale befinden sich die π -Bindungen, die unter p_z -Orbitalen gebildet werden und wesentlich schwächer sind als die σ -Bindungen. In diesen Bindungen sind die Elektronen lokalisiert und bewegen sich zwischen den beiden Kohlenstoffatomen.

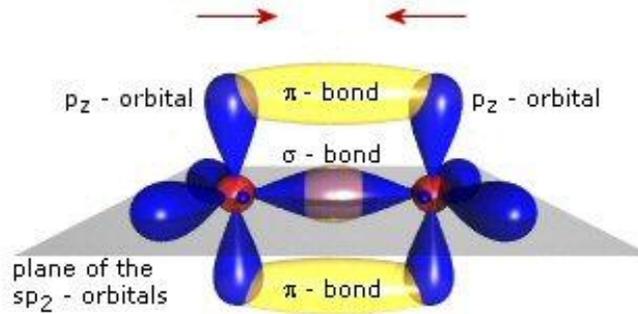


Abbildung 6: Ethen-Molekül als Beispiel für ein Molekül mit Doppelbindung ^[9]

In größeren Molekülen wie dem Benzol-Molekül (s. Abb. 7), bildet sich ein sogenanntes delokalisiertes π -Elektronensystem aus. Man versteht unter einem π -Elektronensystem die Überlappung von p_z -Orbitalen innerhalb eines Moleküls.

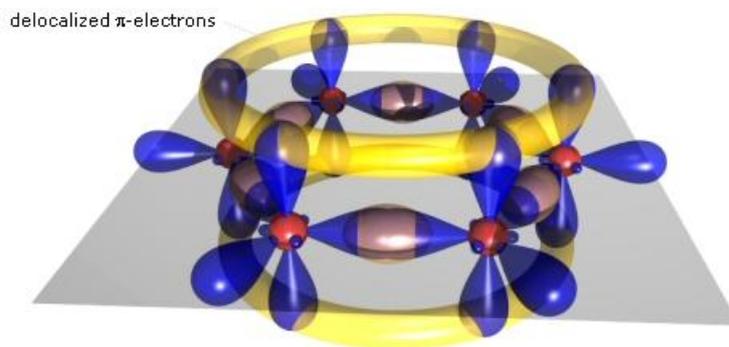


Abbildung 7: Benzol als Beispiel für ein Molekül mit π -Elektronensystem ^[9]

Da die π -Bindungen schwächer als die σ -Bindungen sind, können die π -Elektronen dieser konjugierten Doppelbindung sich frei bewegen. ^[10]

Das Energieniveau der sp^2 -Orbitale spaltet sich auf in ein bindendes σ - und ein antibindendes σ^* -Energieniveau, (s. Abb.8). Außerdem spaltet sich das Energieniveau der p_z -Orbitale auf in ein bindendes π - und ein antibindendes π^* -Orbital. Das bindende π -Niveau mit dem am höchsten besetzten.

Energieniveau bildet das HOMO-Niveau (engl. Highest occupied molecular

orbital), das dem Valenzband in anorganischen Halbleitern entspricht. Das nicht bindende π^* -Niveau mit dem am niedrigsten besetzten Energieniveau bezeichnet man als das LUMO (engl. lowest unoccupied molecular orbital), das dem Leitungsband in anorganischen Halbleitern entspricht. HOMO und LUMO sind damit verantwortlich für die elektronischen Eigenschaften des organischen Halbleiters.

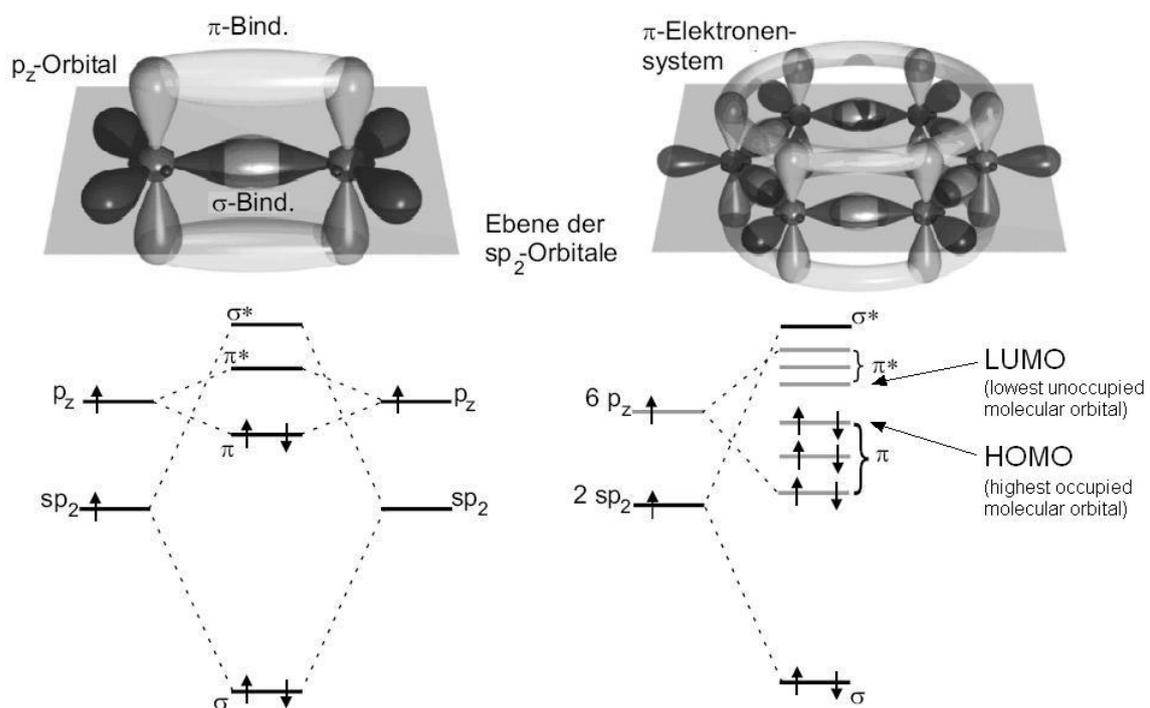


Abbildung 8: links: Ethen-Molekül mit Doppelbindung, rechts: Benzol-Molekül als Beispiel für ein Molekül mit π -Elektronensystem, unten: Aufspaltung der Energie-Niveaus im Ethen-Molekül (links) und im Benzol-Molekül (rechts) ^[9]

Beim Ethen-Molekül gibt es eine 2-fache Aufspaltung der Energieniveaus. Je größer das Molekül ist, desto mehr Energieniveaus gibt es. Beim Benzol-Molekül gibt es eine 6-fache Aufspaltung.

Der energetische Abstand zwischen beiden Niveaus liegt bei 1,5-3 eV, ^[11]

d.h. organische Materialien können zu Halbleitern werden. In organischen

Halbleitermaterialien existieren viele unterschiedliche HOMO- und LUMO-Energieniveaus, über die der elektronische Transport stattfinden kann.

Man betrachtet nicht nur ein einzelnes Molekül mit konjugiertem π -Elektronensystem, sondern auch den organischen Halbleiter in kondensierter Form im Festkörper. Ein einzelnes Molekül hat separierbare Energiezustände. Je mehr Moleküle zusammen kommen, desto mehr HOMO und LUMO kommen zusammen. Gleichzeitig werden die Energiebänder breiter. Mit den breiteren Energiebändern berücksichtigt man die elektronischen und optischen Eigenschaften.

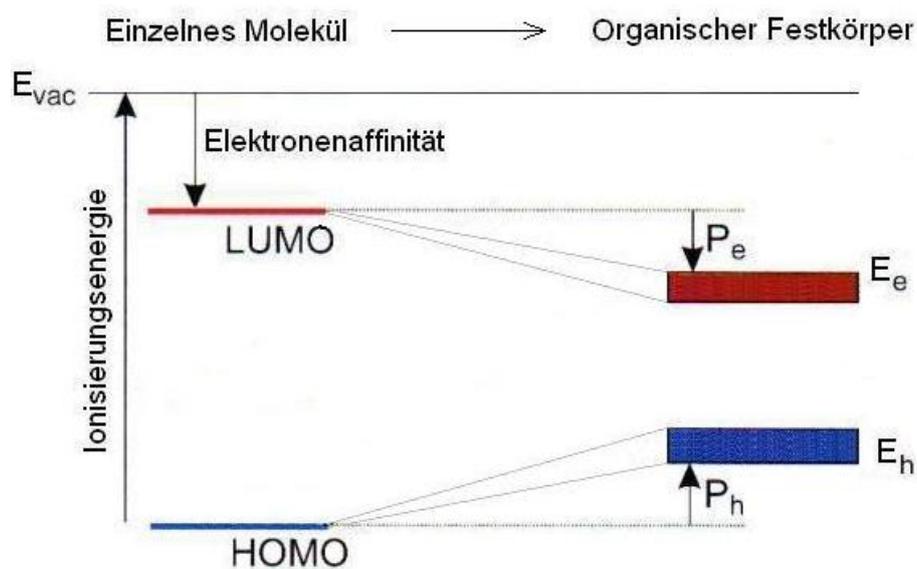


Abbildung 9: Energiebänder HOMO und LUMO im einzelnen Molekül (links) und im Festkörper (rechts), dazwischen die Änderung der Energieniveaus bei wachsender Molekül-Anzahl
 E_{vac} : Vacuumenergie, $P_{e/h}$: Polarisierungsenergie der Elektronen/Löcher,
 $E_{e/h}$: Energie der Elektronen/Löcher^[12]

2.2 Organische Leuchtdioden (OLEDs)

In folgendem Kapitel wird ein Überblick über Funktionsmechanismen und Materialien von Einschicht-organischen Leuchtdioden, sog. OLEDs gegeben. Weiter werden verschiedene OLED-Typen diskutiert.

2.2.1 Die Schichtenfolge in den OLEDs

Der Aufbau einer Einschicht-OLED ist einfach. Bei der Einschicht-OLED befindet sich die organische Schicht zwischen zwei Elektroden. Die Anode ist durchsichtig und gewöhnlich wird ein Glas oder flexibler Kunststoff als Träger benutzt. Glas ist ein Isolator. Wenn auf das Glas Indium-Zinn-Oxid (engl. IndiumTinOxide=ITO), ein Mischoxid aus etwa 90% In_2O_3 und 10% SnO_2 , aufgetragen und als transparente Schicht verwendet wird, ist der Glasträger auf einer Seite leitfähig. Die Dicke der Schicht ist ungefähr 180nm. ^[13] Darüber befindet sich eine Emissionsschicht (Emission Layer, EML) aus dem organischen Halbleiter. Als Kathode kann man die Metalle, die eine geringe Elektronenaustrittsarbeit haben, benutzen, z.B. Magnesium, Calcium, Barium oder Aluminium.

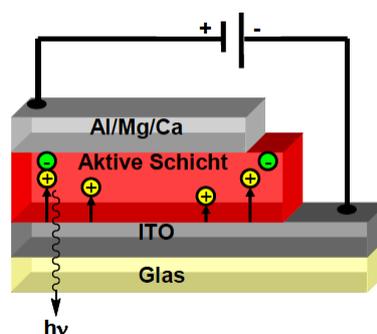


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer organischen Leuchtdiode (OLED). ^[12]

2.2.2 Funktionsmechanismen einer OLED

Dieses Kapitel behandelt die grundlegenden Funktionsmechanismen der organischen Leuchtdioden. Abbildung 2.8 zeigt die organischen Elektrolumineszenz relevanten photophysikalischen Prozesse in fluoreszenten Materialien in einem Flussdiagramm.

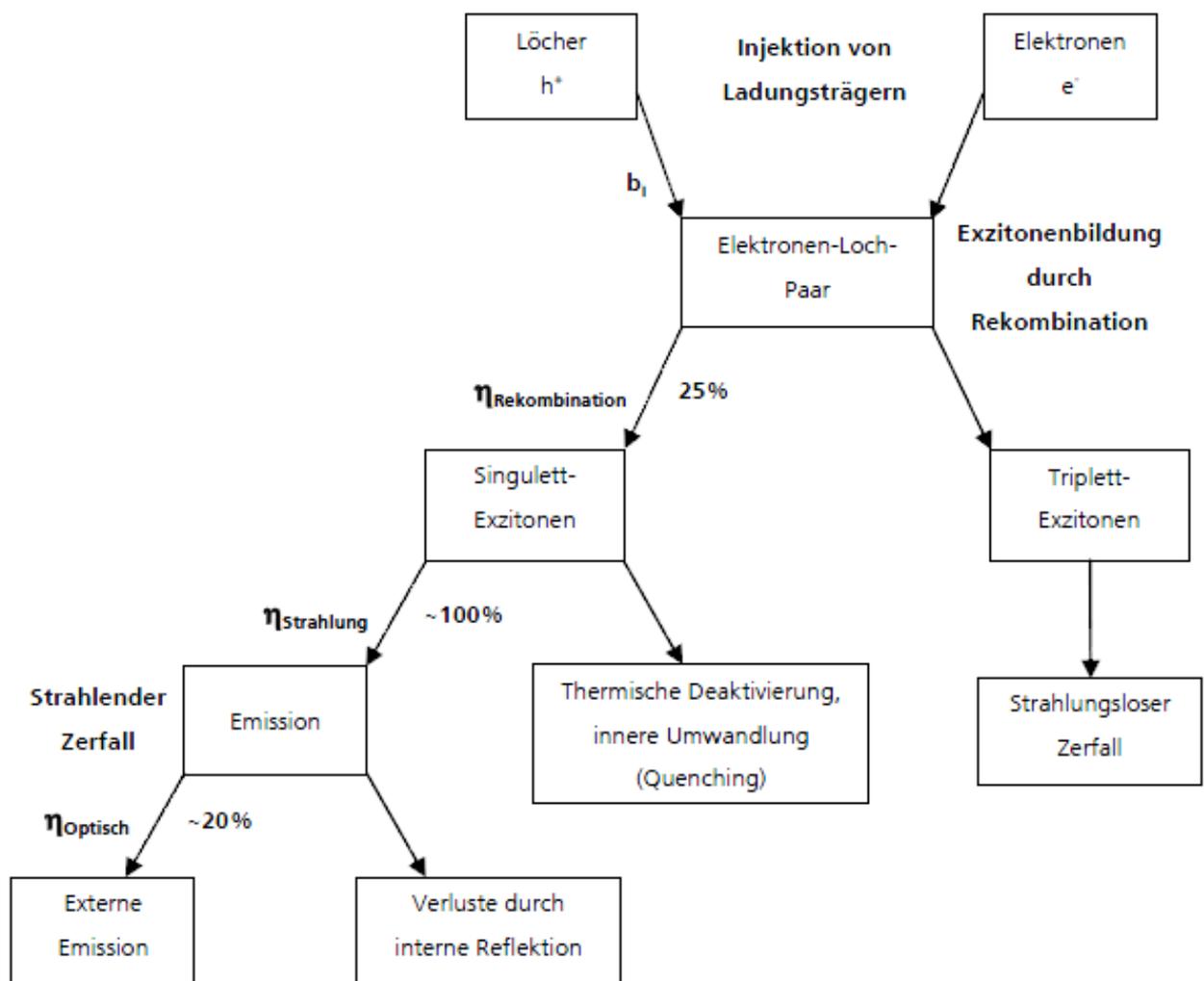


Abbildung 11: Flussdiagramm der Funktionsmechanismen ^[14]

Wie erfolgt die Injektion von Löchern und Elektronen?

Für die Rekombination und die folgende Lichtemission ist es notwendig, Löcher und Elektronen über die Elektroden zu injizieren. Durch diese Polung werden von der Kathode Elektronen in das LUMO-Niveau injiziert und über die Anode gelangen die Löcher in das HOMO-Niveau des Polymermoleküls. Über die Delokalisation der π -Elektronen ist auch das injizierte Loch über das gesamte Polymermolekül delokalisiert und kann schnell in Richtung Kathode weiter transportiert werden. Um in das Polymermolekül ein Loch zu injizieren, muss aus dem höchst besetzten Molekülorbital (HOMO) des Polymermoleküls ein Elektron in das Leitungsband des ITOs abgeführt werden. Das injizierte Loch ist durch die Konjugation über das Molekül hinweg delokalisiert und kann schnell in Richtung Kathode weiter transportiert werden. Je näher das Leitungsband der Anode energetisch zum HOMO des Emittermoleküls liegt, desto einfacher ist die Injektion von Löchern. Das injizierte Elektron ist im LUMO delokalisiert und kann an Nachbarmoleküle in Richtung Anode übertragen werden. Die Injektion eines Elektrons muss in das LUMO der Moleküle des Polymers erfolgen, da das HOMO voll besetzt ist.

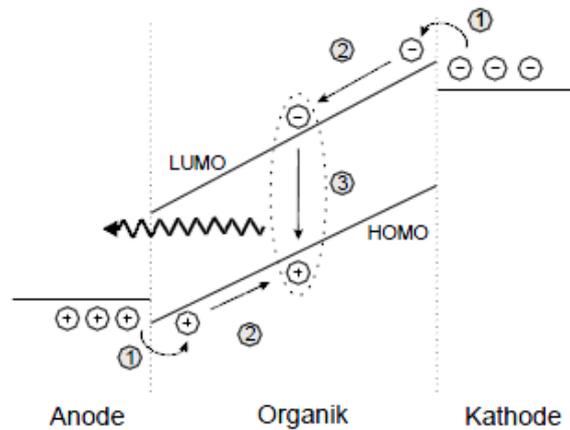


Abbildung 12: Energieschema einer Einschicht-OLED ^[15]

Wie erfolgen intermolekularer Lochtransport und Elektronentransport?

Die injizierten Ladungsträger können sich im organischen Halbleiter aufeinander zu bewegen. In organischen Halbleitern müssen sich die Ladungsträger zwischen zwei Molekülen nach einem sog. „Hopping-Mechanismus“ bewegen. ^[16] Der Mechanismus beschreibt den Ladungsträgertransport der Elektronen und Löcher über eine Potentialbarriere hinweg. Der Sprung zwischen den energetischen Niveaus wird als „Hüpfen“ beschrieben. Die Bewegung während des Hüpfprozesses kommt in einer Redoxreaktion zwischen den chemisch und strukturell identischen Molekülen zustande.

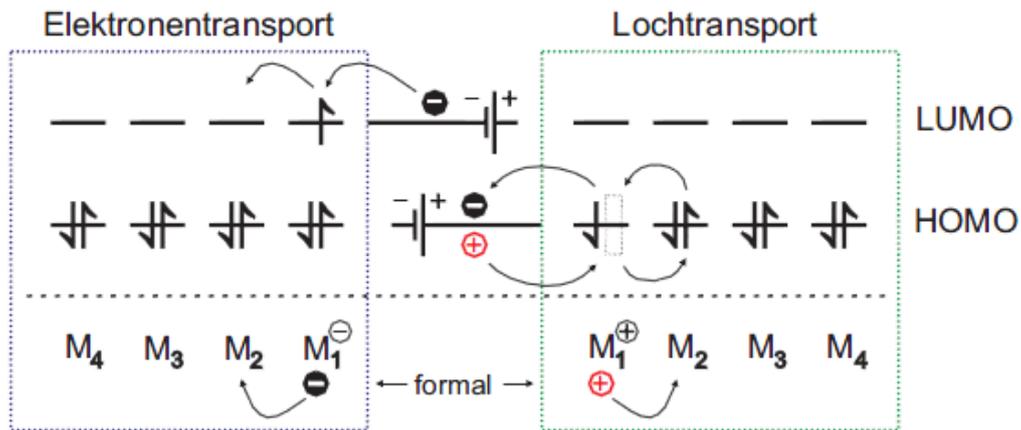


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Hüpfp Prozesse zum Ladungsträgertransport. links: Elektronentransport- nach der Injektion eines Elektrons in das LUMO des ersten Moleküls (M_1^\ominus) wird das Elektron nach 'links' transportiert, indem das Molekül M_2 von M_1^\ominus reduziert wird, während M_1^\ominus dabei zum oxidiert wird. rechts: Lochtransport durch Abgabe eines Elektrons aus dem HOMO wird ein Ladungsloch injiziert (M_1^\oplus). Dieses wird nach 'rechts' transportiert, indem M_2 von M_1^\oplus oxidiert wird, während M_1^\oplus dabei reduziert wird. ^[17]

Das Funktionsprinzip hat die elektrische Leitfähigkeit innerhalb konjugierter Moleküle geklärt und zeigt den Unterschied zwischen metallischen und organischen Halbleitern. Während die Elektronen in Metallen über das gesamte Metallgitter, also die gesamte Stoffportion, delokalisiert sind (Abb. 14), beschränkt sich die Delokalisation der Elektronen in Stoffportionen konjugierter Polymere lediglich auf die einzelnen Moleküle. (Abb. 15).

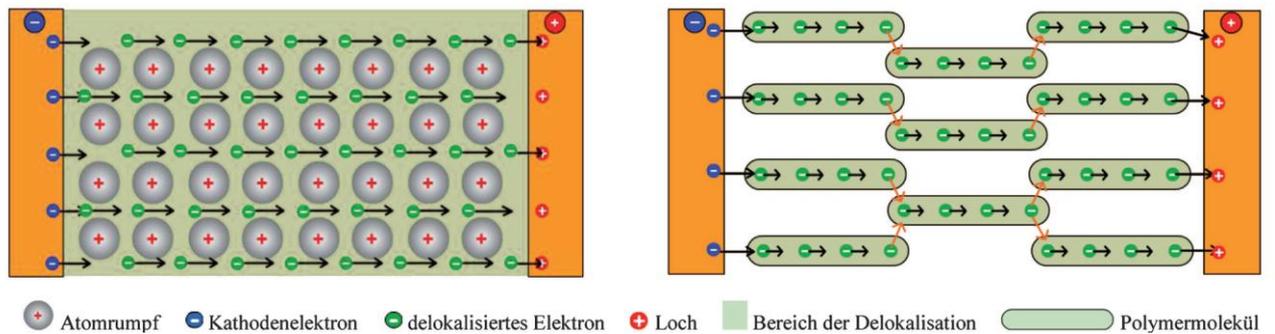


Abbildung 14: Modell des Stromflusses in einer Metallportion. Zwischen den positiv geladenen Atomrümpfen können sich die Elektronen frei durch die gesamte Stoffportion bewegen.

Die grüne Fläche zeigt den Bereich der Delokalisation an.

Abbildung 15: Modell des Stromflusses in einem konjugierten Polymer. Nur innerhalb der Moleküle sind Elektronen delokalisiert. Zwischen den Molekülen müssen Elektronen über Hüpfprozesse Energiebarrieren überwinden (orangene Pfeile).^[18]

Wie erfolgt die Rekombination?

Wenn die Löcher im HOMO und Elektronen im LUMO auf ihrem Weg durch das organische Material sich näher kommen, treffen die Ladungsträger durch Coulombkraft aufeinander. Dabei entsteht ein Elektron-Loch-Paar, auch Exciton genannt. Dieses Exciton hat ein starkes Deaktivierungsbestreben. Die Deaktivierung erfolgt mittels Fluoreszenz oder Wärmestrahlung. Dabei wird die Energie E_g , die der Unterschied zwischen HOMO und LUMO ist, freigelassen. Die Lichtemission ist umso wahrscheinlicher, je weniger Schwingungsniveaus existieren, d.h. umso starrer das Molekülgerüst ist. Hierbei gibt es zwei Arten von Excitonen, die Singulett-Excitonen und die Triplett-Excitonen.

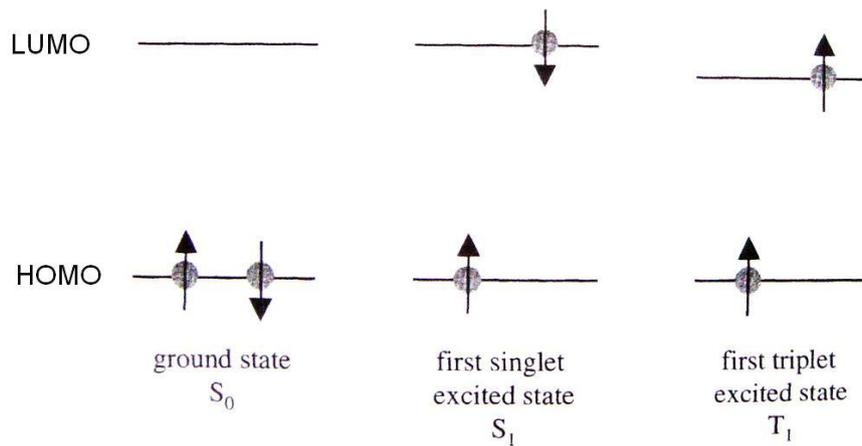


Abbildung 16: Schematische Darstellung von Singulett- und Triplett-Excitonen ^[1,513]

Singulett-Excitonen sind energiereicher und notwendig für Fluoreszenz. Fast alle niedermolekularen Emitterfarbstoffe werden als Singulett-Emitter genutzt. Wie in Abb.11 gezeigt, lassen sich nur 25% der zugeführten Energie in Photonenstrahlung umwandeln, es gehen 75% der gebildeten Excitonen für die erwünschte Elektrolumineszenz verloren. ^[14]

Seit 1988 werden im OLED-Bereich auch Triplett-Excitonen angewendet. Das Problem des Spinverbots kann aufgrund des Schweratomeffekts der Metallionen gelöst werden. ^[13,S.13] In Gegenwart bestimmter Schwermetalle wie Iridium oder Platin rekombinieren die Excitonen von dort sehr schnell mit Phosphoreszenz im sichtbaren Bereich.

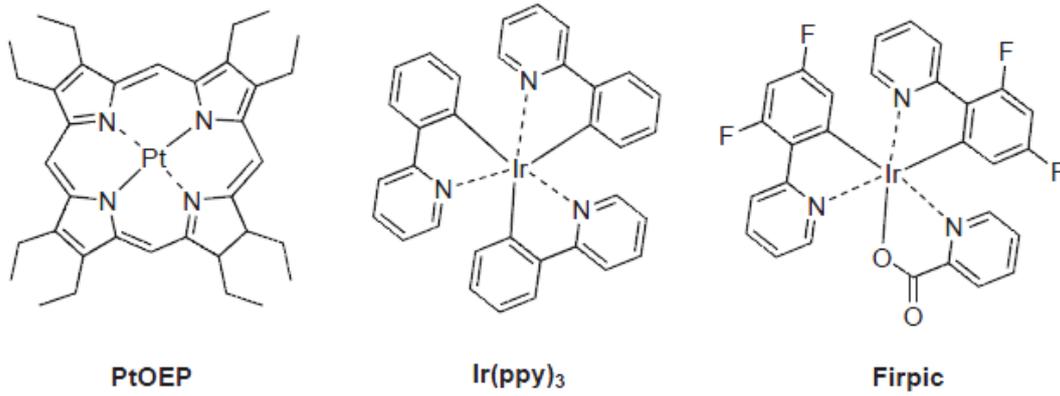


Abbildung 17: Triplett-Emitter-Komplexe mit Schwermetallen als Zentralatom. Platinocetaethylporphyrin (PtOEP -rot), fac-Tris(2-phenylpyridin)iridium (Ir(ppy)₃ -grün) und Firpic (blau).^[17,S29]

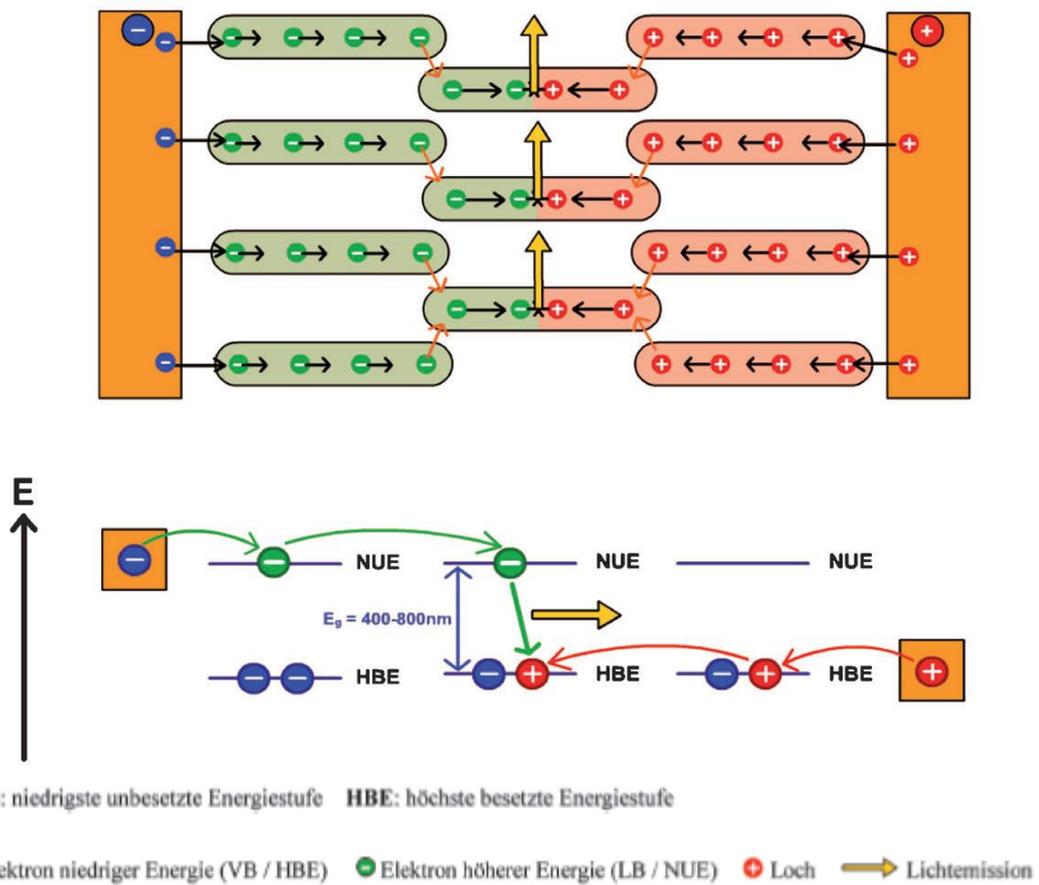


Abbildung 18: Die Elektrolumineszenz in organischen Halbleitermolekülen im Strukturmodell (oben) und Energiestufenmodell (unten).^[18]

2.2.3 Moderne OLEDs

Mehrschicht-OLEDs

Einfache Organische Leuchtdioden erfordern eine Schicht eines elektrolumineszierenden Materials zwischen zwei Elektroden. Es werden, wie im Kapitel 2.2.2 vorgestellt, an der Kathode Elektronen in das LUMO-Niveau und Löcher in das HOMO-Niveau injiziert. Für eine optimale Injektion der Ladungsträger sollten die Niveaus der Austrittsarbeiten auf der Anodenseite sowie der Kathodenseite mit dem HOMO- bzw. dem LUMO-Niveau übereinstimmen. Die Mobilität und die Stromdichte in einer organischen Schicht sind für Elektronen und Löcher unterschiedlich. Die Beweglichkeit der Löcher liegt in organischen HLn im Vergleich zwei Größenordnungen über der Beweglichkeit der Elektronen. Daher wird eine Löchertransportschicht HTL und eine Elektronentransportschicht ETL benötigt. HTL und ETL haben die Aufgabe, den Verlust der Löcher und der Elektronen möglichst beim Transport bis zur Licht emittierenden Schicht zu verringern. Dadurch kann die Rekombination in der Licht emittierenden Schicht erhöht und damit die Eigenschaften der OLEDs verbessert werden. Als Material der Elektronentransportschicht (ETL) kann der Komplex Tris(8-oxychinolato)aluminium Alq_3 verwendet werden. ^[2] Das stabile Material wird oft gleichzeitig als effizienter grüner Emitter (mit breiter Emission um 550 nm) verwendet. Für die Löchertransportschicht (HTL) soll das Material durch die anodische Oxidation die Radikalkationen bilden. Die Praxis hat gezeigt, dass Triarylamin in besonderer Weise für den

Lochtransport geeignet ist.^[19] Häufig verwendet man speziell

N,N'-diphenyl-N,N'-bis(3-methylphenyl)(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine (TPD)

und α -NPB als Lochtransportmaterialien.

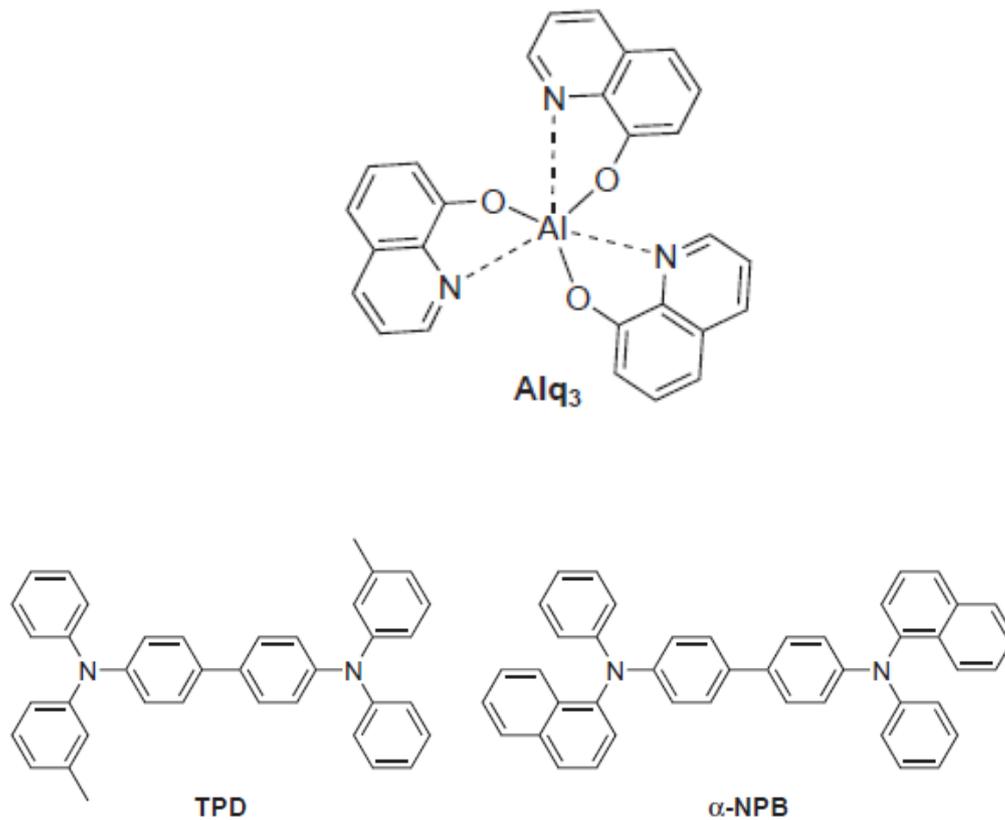


Abbildung 19: Struktur von Tris(8-oxychinolinato)aluminium (Alq₃) und Struktur der klassischen Lochleiter auf Triarylaminbasis TPD und α -NPB^[17]

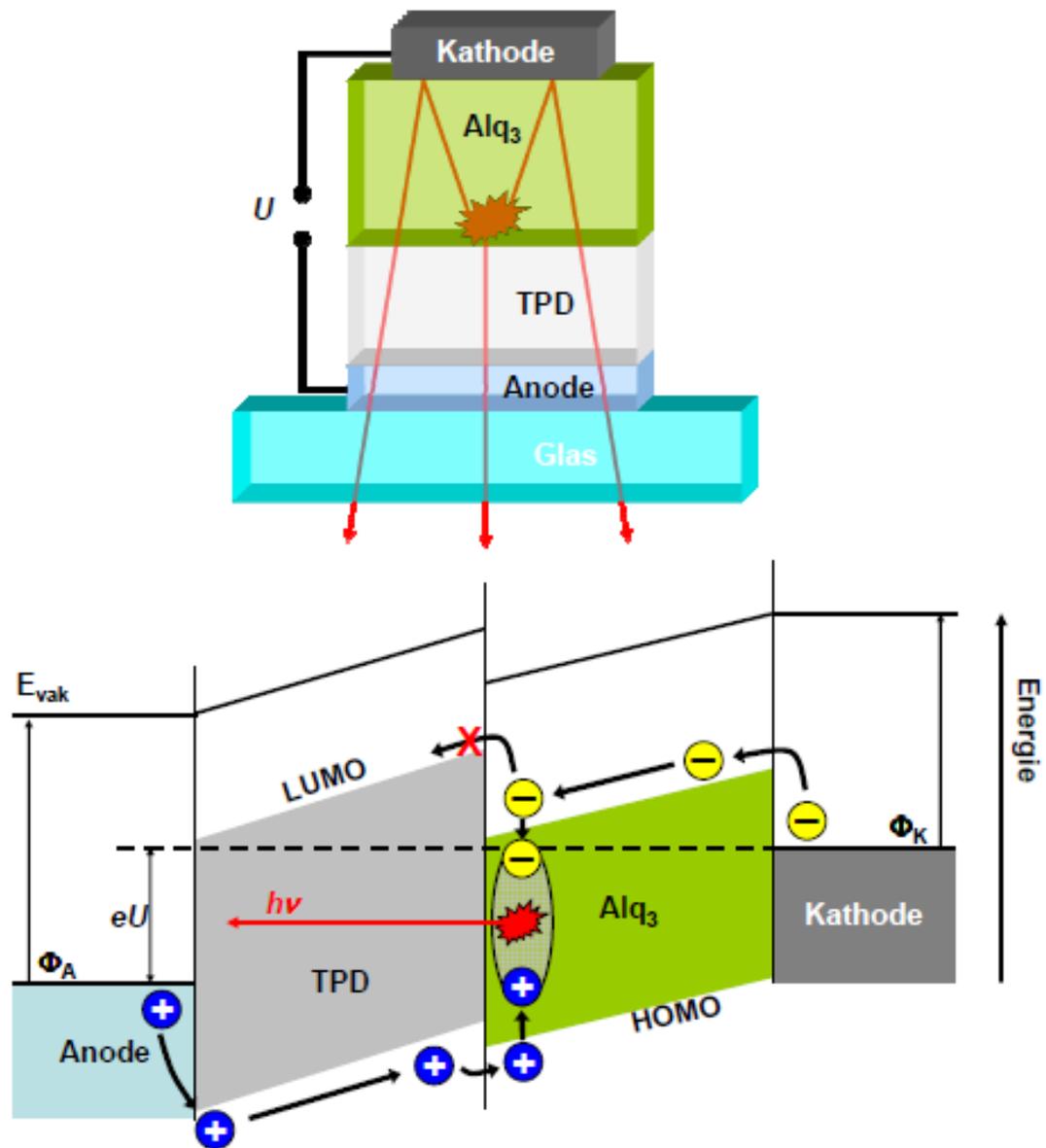


Abbildung 20: Schematischer Aufbau und energetische Verhältnisse in einer Zweischicht-Diode mit Elektronentransportschicht (ETL) und Lochtransportschicht (HTL) ^[20]

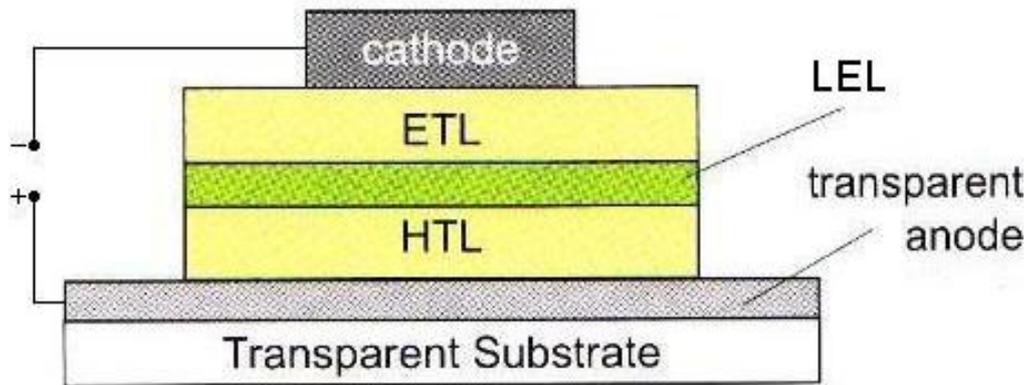


Abbildung 21: Aufbau einer Mehrschicht-OLED mit Elektronentransportschicht ETL (elektron transport layer), LEL (light emitting layer) und Lochertransportschicht HTL (hole transport layer) ^[12]

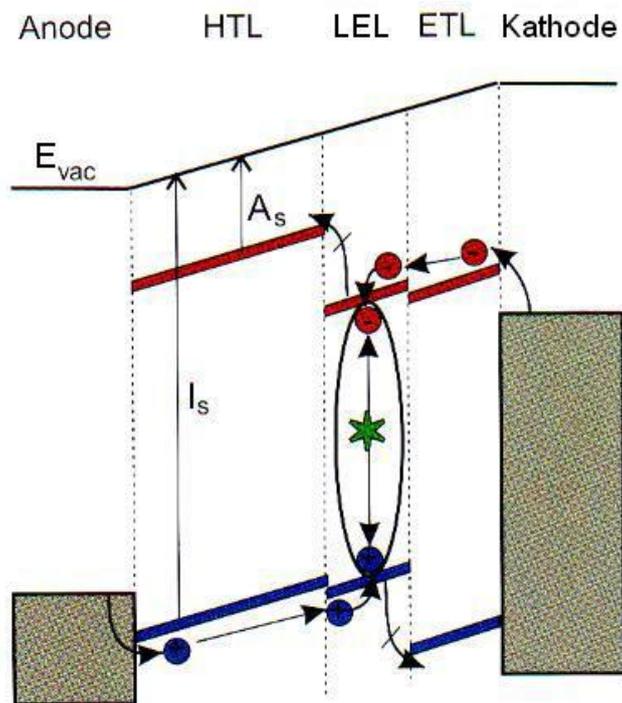


Abbildung 22: Bandschema einer Mehrschicht-OLED, I_s : Ionisierungsenergie, A_s : Elektronenaffinität ^[12]

Display

OLEDs werden oft in Displays eingesetzt, wo die Vorteile der organischen Leuchtdioden besonders zur Geltung kommen. OLEDs spielen eine wichtige Rolle in monochromen Anzeigen für mobile Geräte wie Handys und MP3-Player und auch große Vollfarb-Displays für Computermonitore und Großbildfernseher. Ein Display mit Standard-Glas-Verkapselung besteht aus einem Glassubstrat mit einer OLED-Schicht, die mit einer Glasabdeckung mit Trocknungsschicht verkapselt ist. Diese Schicht soll eventuell eindringende Feuchtigkeit absorbieren, die die OLED-Schicht zerstören kann.

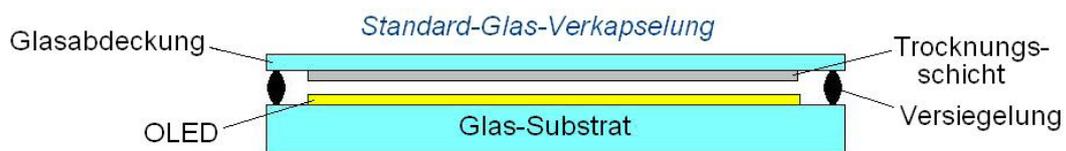
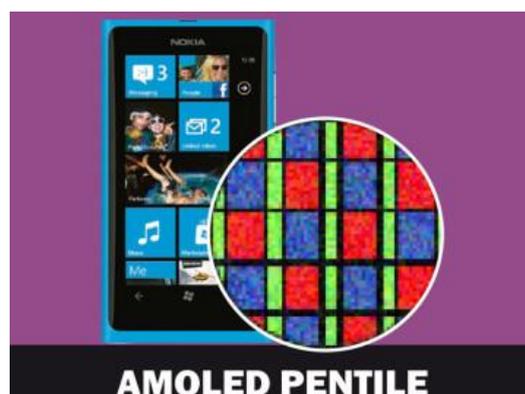


Abbildung 23: Aufbau eines Displays mit Standard-Glas-Verkapselung ^[1,512]

Flexible OLED- Displays haben eine Trägersubstanz aus dünnen Metallfolien oder Kunststoff. Das Display ist sehr leicht und hat höhere Farbtiefe und besser Bildqualität, weil die Pixel (grün, blau, rot) nebeneinander angeordnet werden. Das Resultat ist ein flexibles Video-Display.





**Abbildung 24: Aufbau eines Displays mit Dünnfilm-Kunststoff-Verkapselung (oben),
Resultat: flexibles Display, Prototyp von Samsung und LG(unten) ^[1,5,12,18]**

Kapitel 3

Experimenteller Teil

Im Mittelpunkt dieses Abschnitts stehen die Schritte des Aufbaus eines low-cost OLEDs mit Superyellow. Hierbei werden die benutzten Materialien und Methoden vorgestellt. Weiterhin wird das Messsystem zur Charakterisierung der OLEDs beschrieben und diskutiert.

3.1 Chemikalien und Geräte

Die Funktionen der Chemikalien und Geräte sollen im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die organischen Chemikalien werden auf ITO-Glas oder flexible Träger wie Folie aufgetragen. Für den Bau einer low-cost OLED wird Superyellow, das ein Polymer ist, als Funktionsschicht benutzt. Bei der Herstellung von OLEDs mit Polymeren wird die organische Schicht mit Spincoating als dünne Schicht hergestellt. Weiter werden die Hohlräume und die Zuleitung angebracht. Der letzte Schritt ist das Einspritzen des Galinstans und die Inbetriebnahme. Erst werden die Chemikalien und die Geräte her-, bzw. bereitgestellt. ^[18]

Geräte: Bohrmaschine (~ 3000 U/min), Spritzschutz für Spincoating, Multimeter mit 2 Anschlusskabeln, 2 Krokodilklemmen, 9 V Blockbatterie, 1 mL Einwegspritze mit Kanüle, Doppelseitiges Klebeband, Klebefilmrolle, Schere ,Zellstofftücher zum Reinigen, 1 ITO-Glas* (3,5 cm × 3,5 cm).

Chemikalien: Superyellow in Toluol (F, leicht entzündlich), (Xn, gesundheitsschädlich), Galinstan, selbstklebende Kupferfolie, Aceton (F, leicht entzündlich), (Xi, reizend)

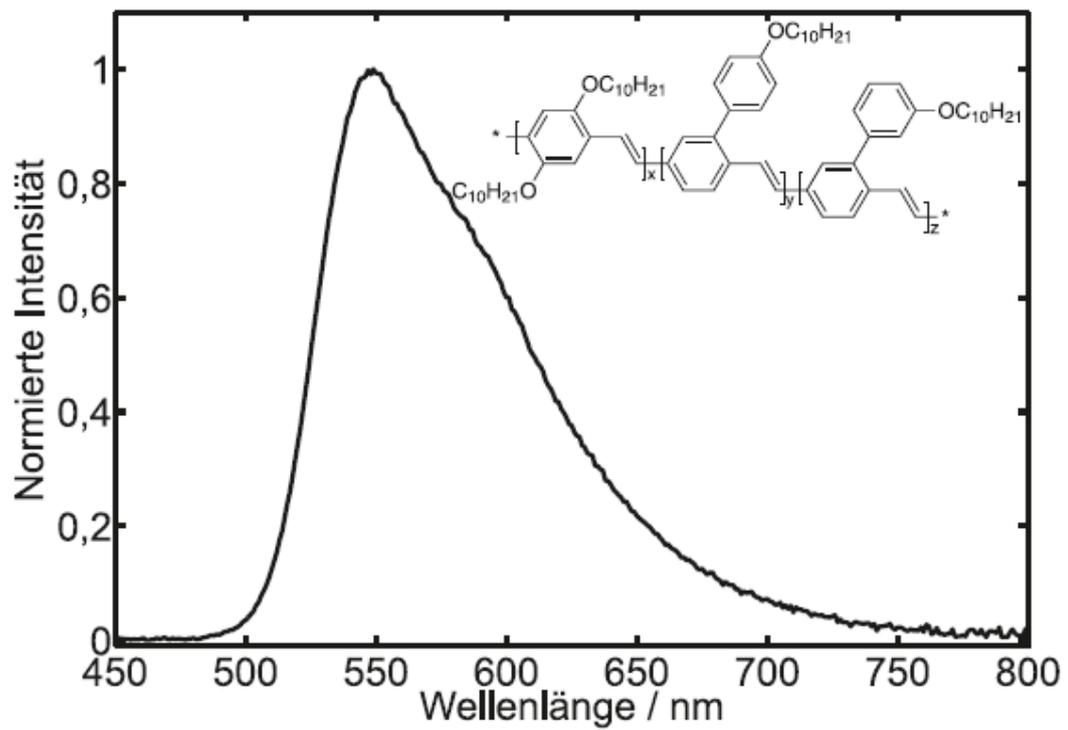


Abbildung 25: Struktur und Emissionsspektrum des Copolymers Superyellow[®] (Merck) ^[21]



Abbildung 26: Superyellowlösung und Einwegspritze

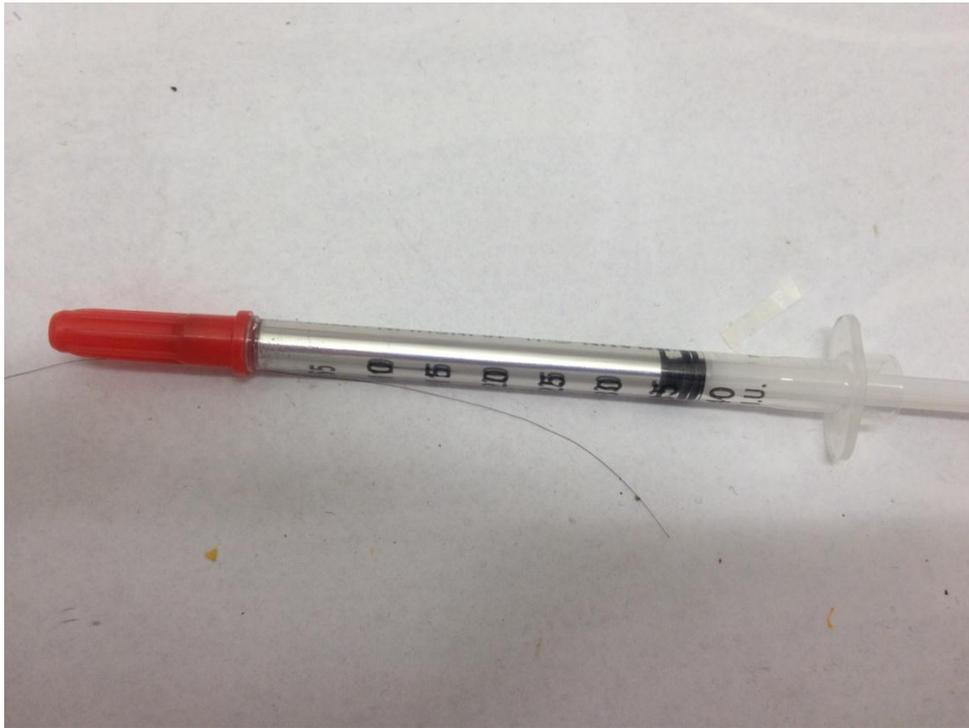


Abbildung 27: Galinstan in Einwegspritze

Welche Aufgabe hat Galinstan in der OLED?

Galinstan ist eine Legierung, die sich aus Gallium, Indium und Zinn zusammensetzt. Sie hat die Aufgabe, Elektronen aus der Spannungsquelle in Polymermoleküle zu injizieren. Die Legierung ist flüssig, sodass ein guter Kontakt zwischen der Kathode und der PPV-Schicht gewährleistet ist.

Welche Aufgabe hat ITO-Glas für OLED?

Die Bezeichnung **ITO** leitet sich aus der englischen Bezeichnung **Indium Tin Oxide** für Indiumzinnoxid ab. Indiumzinnoxid ist ein Mischoxid aus Indiumoxid und Zinnoxid.^[22] Es ist halbleitend und transparent. Diese Eigenschaften sind günstig für die Herstellung elektrisch leitfähiger Gläser als Anode für OLED. Das normale Glas kann Elektronen nicht leiten. Wenn es mit

3. Experimenteller Teil

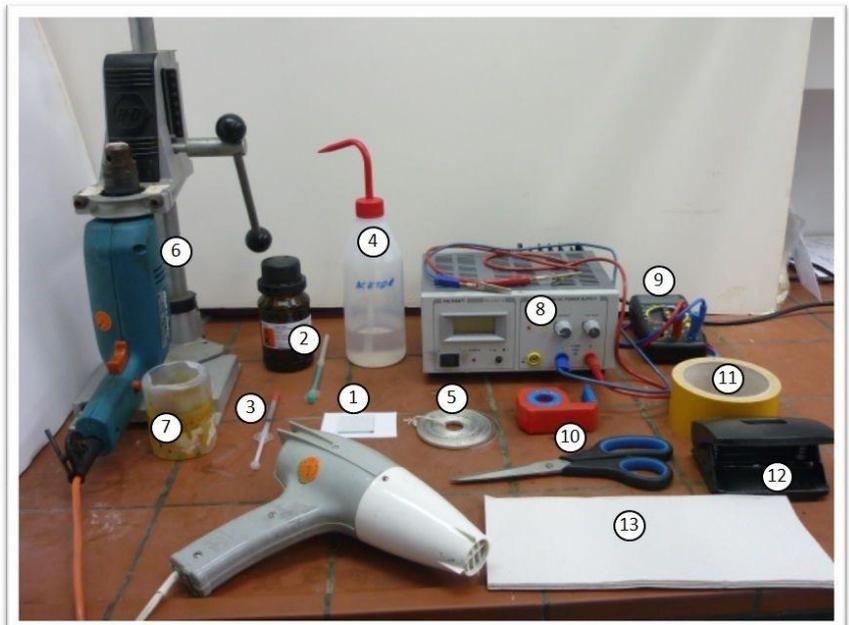
einer sehr dünnen Schicht Indiumzinnoxid überzogen wird, erhält man einseitig leitfähiges, transparentes Glas.



Abbildung 28: Das ITO-Glas ist einseitig beschichtetes, Elektronen leitfähiges Glas

Folgende Komponenten benötigt man für den Bau einer eigenen OLED

1. ITO-Glas (3,5 x 3,5 cm)*
2. Superyellowlösung und Einwegspritze*
3. Galinastan in Einwegspritze*
4. Aceton in Spritzflasche
5. Ein Stück Magnesiumband
6. Bohrmaschine (>2000U/min) mit Einspannvorrichtung
7. Spritzschutz (aus alter Spritzflasche)
8. 12V Gleichspannungsquelle inkl. zwei Kabeln mit Krokodilklemmen
9. Multimeter inkl. zwei Kabeln
10. Tesafilmrolle und große Schere
11. Doppelseitiges Klebeband mit einer Breite von 50mm (Standard)
12. Locher ohne Bodenabdeckung
13. Zellstofftücher
14. (Optional einen Föhn zum Trocknen)



*Diese Materialien erhalten Sie über unsere Fachgruppe (Ansprechpartner: Amitabh Banerji)

Abbildung 29: Folgende Komponenten benötigt man für den Bau einer Low-Cost OLED ^[23]

3.2 Bau einer low-Cost OLED

Versuchsdurchführung und –beobachtung werden in diesem Kapitel Schritt für Schritt dargestellt.

1. Vorbereiten des ITO – Glases

Das ITO-Glas wird zunächst mit Wasser gereinigt, getrocknet und von beiden Seiten gut mit einem mit Aceton getränkten Zellstofftuch abgerieben. Die leitfähige Seite des ITO-Glases wird bestimmt, indem man mit dem Multimeter eine Widerstandsmessung durchführt. Die Seite, die einen Wert von ca. $0.03 \text{ k}\Omega$ anzeigt, ist die leitfähige. Das obere Drittel dieser, der leitfähigen Seite, wird mit Klebefilm bündig abgeklebt.

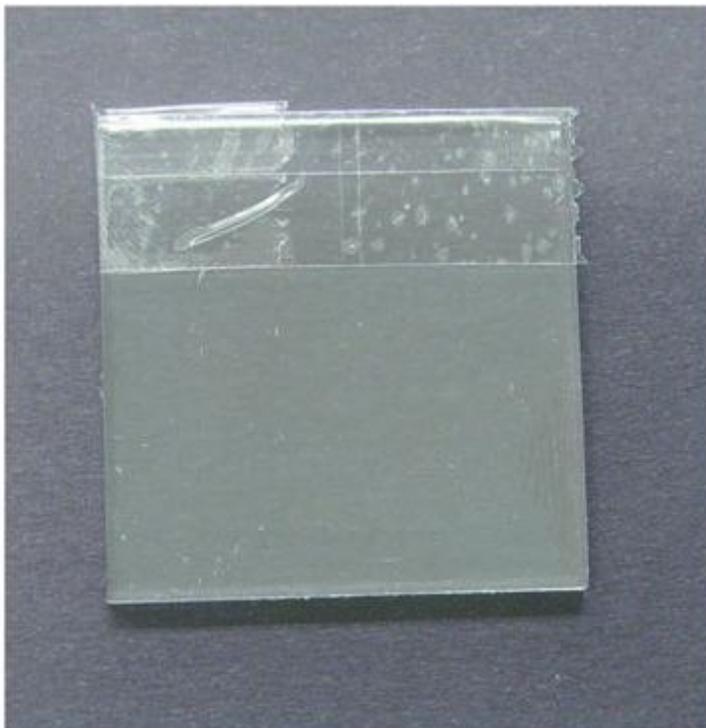


Abbildung 30: Das ITO- Glas mit Klebefilm

2. Spincoating mit Superyellow

Die Bohrmaschine wird unter dem Abzug senkrecht mit der Spitze nach oben in ein Stativ eingespannt und das Bohrfutter des Bohrers komplett geschlossen. Mithilfe eines kleinen Stücks doppelseitigen Klebebands wird das ITO-Glas auf dem Bohrfutter fixiert, sodass die leitfähige Seite nach oben blickt.



Abbildung 31: Bohrmaschine

Ein Spritzschutz, der aus einer zurecht geschnittenen 0,5 L-PET-Flasche gefertigt wurde, wird nun über das Bohrfutter gestülpt. Nun werden mit der Spritze ca. 0,15 mL Superyellow-Lösung mittig zum Drehpunkt der Bohrmaschine auf das ITO-Glas injiziert. Die Maschine muss nun mit voller

3. Experimenteller Teil

Drehkraft gestartet und für ca. 30 Sekunden im Spincoat gehalten werden.

Das Ergebnis sollte eine dünne durchgehende Schicht aus Superyellow auf dem ITO-Glas sein. Der Klebefilm aus Schritt 1 wird entfernt..

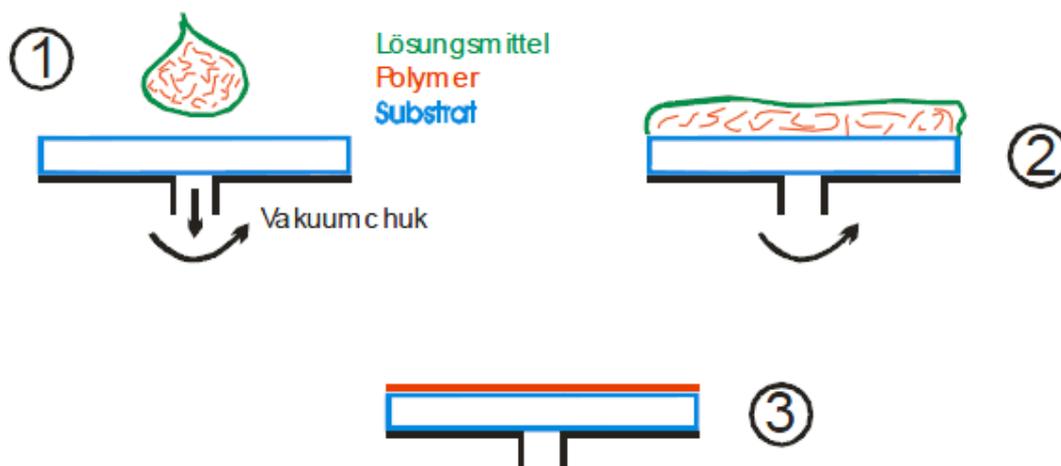
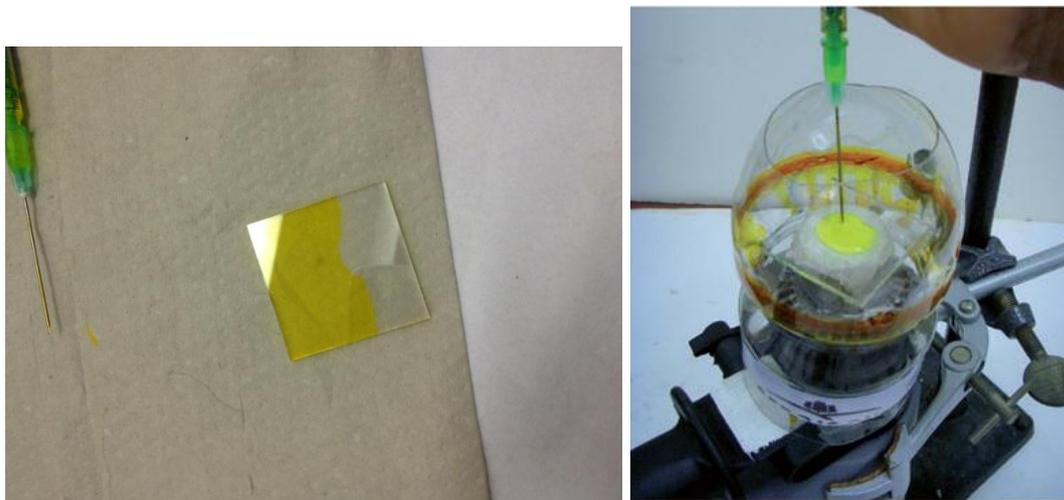


Abbildung 32: Spincoating mit Superyellow.

Ein Tropfen einer Superyellowlösung wird auf das Substrat aufgebracht. Dann wird das Substrat bei einer hohen Drehzahl für eine bestimmte Zeit gedreht. Dabei verdunstet das Lösungsmittel und eine dünne Schicht des Polymers bildet sich aus.

[24]

Achtung! Da beim Spincoaten Toluol verdunstet, sollte dieser Schritt unter dem Abzug und nur unter Aufsicht einer Lehrperson erfolgen.

3. Anbringen der Hohlräume und der Zuleitung

Man muss nun drei Streifen doppelseitiges Klebeband (ca. 3,5 cm × 2,5 cm) miteinander verkleben und drei Löcher mit Hilfe eines Lochers in die Schicht stanzen. Das Klebeband muss auf die Superyellowschicht aufgebracht werden, dabei darf die zweite Schutzfolie nicht entfernt werden. Dann bringt man schmale Streifen Kupferfolie als Zuleitung so an, dass ein Ende gerade in das Loch hineinragt, während das andere Ende zur Glaskante hin abgeknickt wird (Abb.33). Alle drei Löcher werden mit einem Stück Klebefilm überklebt, sodass drei geschlossene Hohlräume gebildet werden. Man muss den Klebefilm fest andrücken, ohne die Hohlräume einzudrücken.



Abbildung 33: Die Klebebandschicht für das Galinstan mit Kupferzuleitungen.

4. Einspritzen des Galinstans und Inbetriebnahme

Die Lochkanten werden mit der Galinstanspritze vorsichtig eingestochen und die drei Hohlräume maximal mit der Legierung ausgefüllt. Evtl. austretendes Galinstan kann man vorsichtig mit der Spritze wieder aufsaugen. Mit einer

3. Experimenteller Teil

Krokodilklemme wird nun der Pluspol der 9 V Gleichstromquelle an das freiliegende ITO-Glas angebracht. Nach Abdunklung des Raums wird nacheinander die Kupferzuleitung der drei Emissionskreise an den Minuspol des Gleichstroms gehalten.

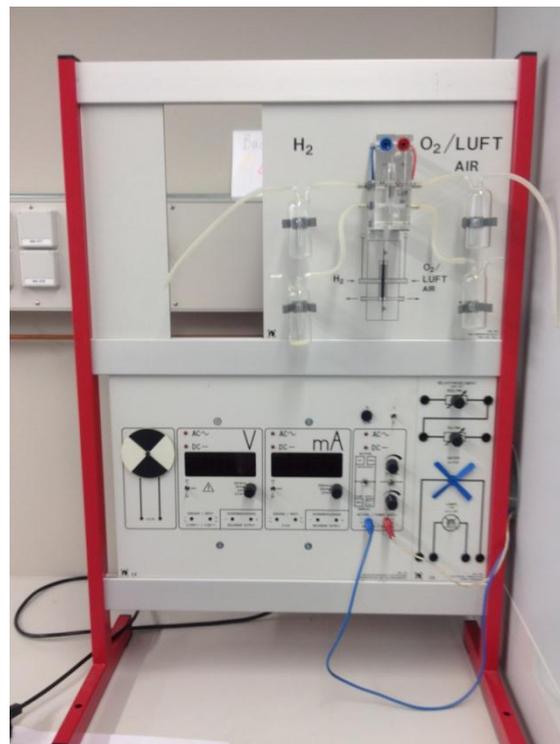


Abbildung 34: Multimeter mit und regelbare Spannungsquelle

Bei Beobachtung der Lumineszenz über eine Minute sollte ein deutliches, gelbes Leuchten zu erkennen sein, das mit zunehmender Betriebszeit stärker wird. Nach spätestens drei Tagen wird die OLED wie nachfolgend erläutert abgebaut.

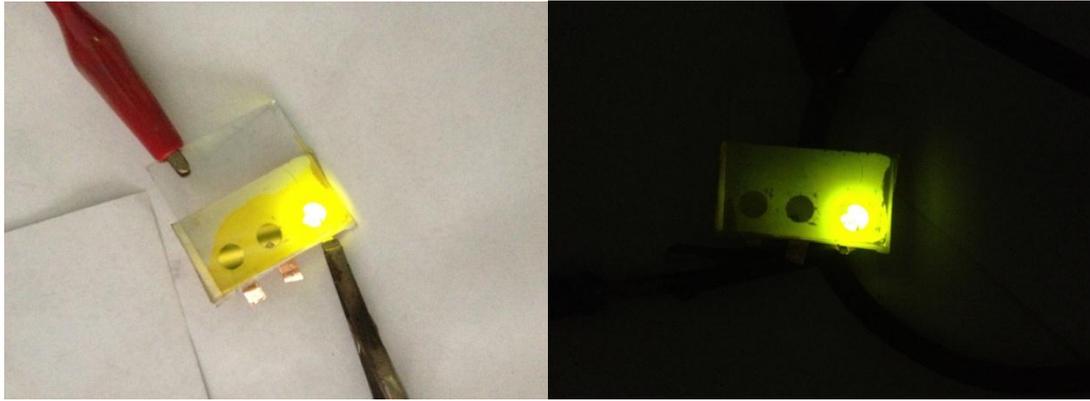


Abbildung 35: Die Elektrolumineszenz der fertigen OLED beim Anlegen einer Spannung von 9 V.

3.3 Meßsystem zur Charakterisierung der OLEDs

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen und die Durchführung der einzelnen Messungen zur Charakterisierung der OLEDs eingegangen. Das Ziel der Messung ist, die Charaktere und Probleme anhand von messtechnischen Verfahren besser zu erkennen.

3.3.1 Strom-Spannungs-Charakterisierung (IV)

I-U-Kennlinie

Die I-U-Kennlinie einer OLED zeigt die generelle Abhängigkeit zwischen Strom und Spannung. Es weist ein typisches Diodenverhalten auf. Verwendet wird eine Spannung zwischen 2 bis 13V einer Gleichspannungsquelle und eine Strom-Spannungs-Kennlinie in 1V-Schritten wird aufgenommen.

Abbildung 3.10 zeigt die Messwerte und schematisch die I-U-Kennlinie.

Spannung(V)	Strom(mA)
1	1,8
2	2,9
3	4
4	5,8
5	7,8
6	10
7	12,7
8	15,3
9	18,3
10	21,4
11	24,3
12	27,2
13	30,6

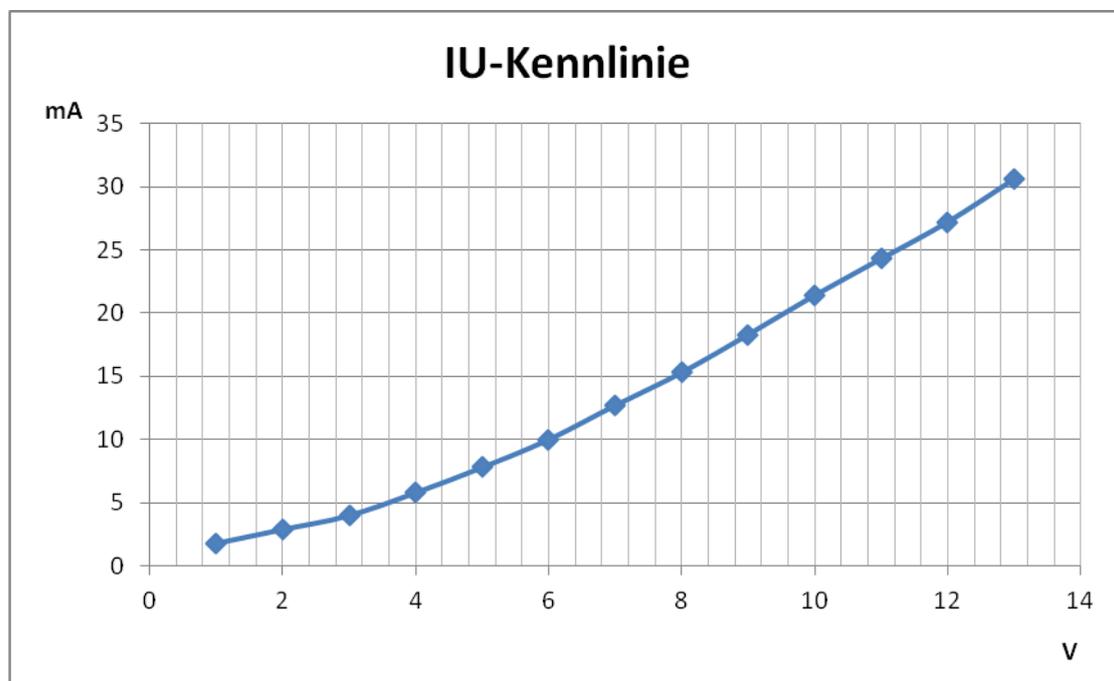
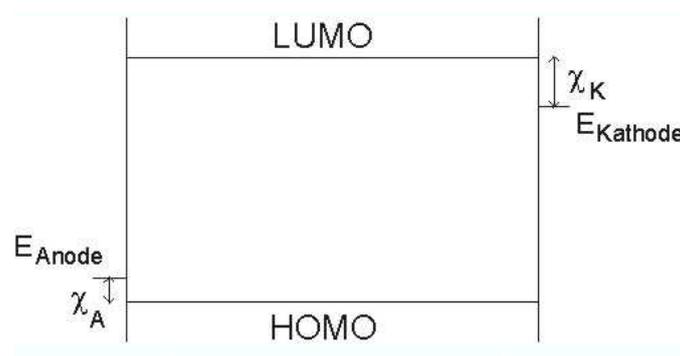


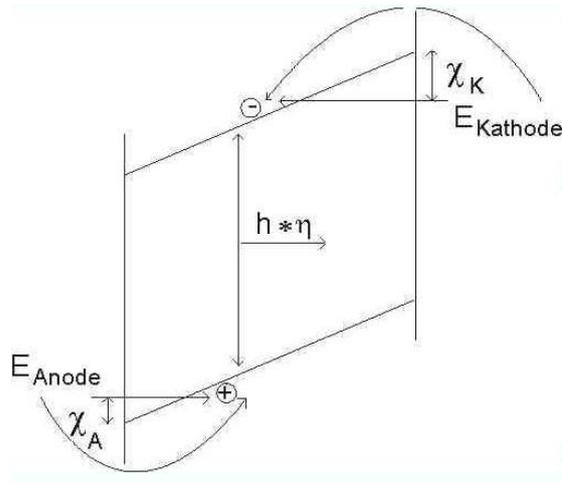
Abbildung 36: Messwert und schematisch die IV-Kennlinie

Erklärung

Mit der in Abbildung 3.10 exemplarisch gezeigten I-U-Kennlinie einer OLED wird das Diodenverhalten dargestellt. Der Strom steigt abhängig von der zunehmenden Spannung. Dieses resultiert aus den stattfindenden Ladungsinjektions- und Transportprozessen an den Grenzflächen zwischen Elektroden und Polymer und innerhalb der Polymerschicht selbst. Zur Injektion von Ladungsträgern aus den Elektroden müssen die Energiebarrieren zwischen der Anode und dem HOMO der Polymeremoleküle sowie der Kathode und dem LUMO der Polymeremoleküle überwunden werden. Legt man eine Spannung an die Elektroden der organischen Leuchtdiode an, so verschieben sich die Energieniveaus derart, dass zwischen negativer Kathode und positiv geladener Anode ein Potentialgefälle entsteht und die Energieniveaus in der organischen Schicht folgendermaßen aussehen:



(A)



(B)

Abbildung 37: (A) Energieniveaus in einer Organischen Leuchtdiode; (B) Lage der Energieniveaus einer OLED unter Einfluss des elektrischen Feldes ^[25]

Die Elektronen besitzen nun die Möglichkeit, in das LUMO des organischen Materials zu gelangen, wenn sie die an der Kathodenseite bestehende Energiebarriere durchtunneln. Auf der Gegenseite können positive Ladungsträger in das organische Material tunneln. Hierzu bedient man sich der sogenannten *Fowler-Nordheim-Gleichung*, die die Stromdichte durch die Feldstärke innerhalb der organischen Schicht beschreiben kann. ^[25] Bei niederen Spannungen überwiegt die thermoionische Injektion über die thermische Anregung und Überwindung der potentiellen Energie. Bei hohen Feldstärken, also hohen Spannungen, steigt die Elektronendichte sehr hoch an und die Wahrscheinlichkeit der Tunnelinjektion steigt exponentiell, so dass es auch zu einem exponentiellen Anstieg des Stromdurchflusses kommt. Das kann man ganz gut an der I-U-Kennlinie (Abb.36) sehen.

$$j_{\text{FN}} = BE^2 e^{-\left(\frac{b}{E}\right)}$$
$$b = \frac{8\pi (2m)^{\frac{1}{2}}}{3he} \chi^{\frac{3}{2}}$$

J: Stromdichte ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)

m: die effektive Masse der Ladungsträger

E: elektrische Feldstärke

h: die Planck-Konstante

B: eine Konstante

e: die Elementarladung

Abbildung 38: Fowler -Nordheim-Tunnelprozess ^[25]

Aus dem oben gezeigten Modell wird deutlich, dass niedrige Energiebarrieren notwendig sind, um den Verlust der Ladungsträger zu verringern. Im Idealfall sollte auf der Anode das Elektrodenmaterial mit großer Austrittsarbeit eingesetzt werden, damit Elektronen leicht aus dem organischen Material aufgenommen werden können. Auf der Kathodenseite muss man Materialien mit geringer Austrittsarbeit, z.B. Aluminium einsetzen. ITO besitzt eine hohe Austrittsarbeit (4,8 eV) und ist transparent, ^[25] so dass das emittierte Licht durchgelassen wird und es das ideale Anodenmaterial ist.

3.3.2 Lebensdaueruntersuchung

Einer der wichtigsten Parameter in Bezug auf technische Anwendungen ist die Lebensdauer einer OLED und es ist auch das größte technische Problem. Eine hohe Stabilität der Leuchtelemente ist insbesondere notwendig für Display- und Beleuchtungsanwendungen. In diesem Kapitel werden die Lebensdauer und die Stabilität der OLEDs durch die Helligkeit im Verhältnis zur Zeit untersucht.

Zeit gegen Luminance Kennlinie

Die Zeit gegen Luminance Kennlinie einer OLED zeigt die Abhängigkeit zwischen Zeit und Luminance. Es kann anschaulich die Lebensdauer durch Luminance einer OLED zeigen. Mit Luminance Meter wird die Leuchtdichte jede 10 Minuten gemessen. Das Ergebnis der Messung wird in der Abbildung 3.13 gezeigt.

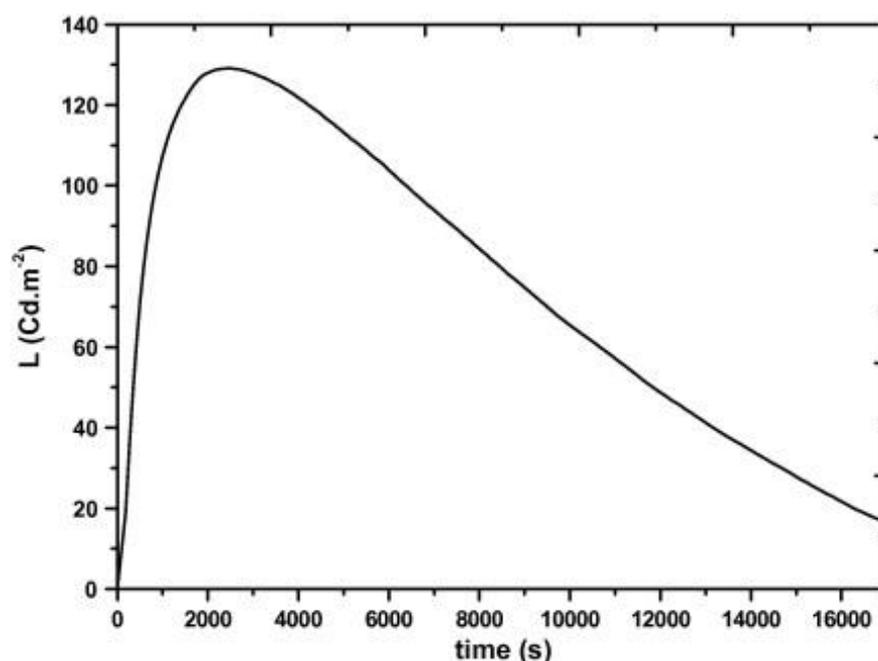


Abbildung 39: Zeit gegen Luminance Kennlinie ^[26]



Abbildung 40: Der Vergleich der Helligkeit einer OLED nach ein Woche

Erklärung

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, kann durch die Rekombination von Löchern und Elektronen in die organische Schicht Fluoreszenz oder Wärmestrahlung erfolgen. Die Lebensdauer hängt stark von der Stabilität der verwendeten Materialien ab. Aufgrund von eindringender Feuchte und Sauerstoff wird die Qualität des organischen Materials zerstört. Für organische Emittermaterialien insbesondere für PPV werden die Vinyleinheiten zu Carbonylgruppen oxidiert, welche als wichtiger Teil für die Elektrolumineszenz wirken. Es erfolgt eine Verkürzung der effektiven Konjugationslänge und Schädigung der Lebensdauer einer OLED. Die Oxidation des Kathodenmetalls, z.B. die Oxidation des Aluminiums, ist auch ein schädlicher Einfluss. Der Effekt ist das Vergrößern der Austrittsarbeit von Metall. Dies schadet direkt der Helligkeit der OLED. Die Degradation der OLED kann auch durch Verunreinigungen in den organischen Materialien, z.B. Stäube oder Fett, verursacht werden. Das Einspritzen des Galinstans ist auch ein Faktor der Helligkeit und der

Homogenität der Leuchte. Wenn nicht genügend Galinstan eingespritzt wurde oder wenn Galinstan entweicht, wodurch sich Luftpinschlüsse bilden, kann dies zum Verlust an Leuchtfläche führen.

Zur Minimierung des Problems, das oben benannt wurde, sollte der Fertigungsprozess unter Reinraumbedingungen und niedriger Temperatur ablaufen. Auch müssen vor dem Aufbau einer OLED alle Geräte, z.B. Locher, ITO-Glas, gut mit einem mit Aceton befeuchteten Zellstofftuch abgerieben werden.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Im Mittelpunkt der vorliegenden Bachelorarbeit standen die Erörterung der Grundlage der organischen Materialien mit π -Elektronensystem, z.B. Polymere und Aromaten und die Herstellung von low-cost organischen Leuchtdioden. In den durchgeführten Untersuchungen wurden die grundlegenden und generellen Charakteristika und Probleme der OLED erkannt. Die low-cost OLED ist ein einfacher Typ einer OLED und kann direkt die Funktionsweise von OLEDs zeigen. Es kann selbst im chemischen Labor aufgebaut werden. Aber für gewöhnliche und tägliche Anwendung ist die Lebensdauer, die oben genannt wurde, ein großes Problem. In professionellen Anlagen kann man mehr funktionelle Schicht zusetzen oder stabilere organische Schichten benutzen, um die Lebensdauer einer OLED zu verlängern und die Effizienz zu erhöhen. Es ist die Herausforderung für die künftige Forschung an OLEDs.

Mit guten Eigenschaften, z.B. die hohe Effizienz, die mechanische Flexibilität und eine potenziell preisgünstige Herstellung werden OLEDs eine wichtige Rolle in Technik und Herstellung großflächiger Bildschirme und in der allgemeinen Beleuchtung in der Welt spielen. Weitere Bereiche werden sich in der Zukunft für OLEDs erschließen und ihr Marktanteil wird stetig wachsen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Pamela Rosado, OLED Ausarbeitung des Seminarvortrags, 2008
- [2] C. W. Tang und S. A. van Slyke, Applied Physics Letters ,1987
- [3] E. Maiser, German Technology: Flat Panel Displays German Flat Panel Display Forum (DFF) VDMA-German Engineering Federation
- [4] <http://www.elektroniktutor.de/bauteile/oled.html>
- [5] Silvio Göthel,OLED Prinzip und Verwendung, im Besonderen in der Displaytechnik, S17 ,TU Dresden
- [6] <http://www.oled.at/images/oled-lamp.jpg>
- [7] A. Böhler,Organische,Elektrolumineszenz-Displays,Dissertation, Institut für Hochfrequenztechnik,TU Braunschweig,1998
- [8] Manfred Schreil, Erzeugung großflächiger Leuchtdioden in einem vertikalen In-Line-Bedampfungssystem, Institut für Angewandte Photophysik Fachrichtung Physik Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften,TU Dresden,2004
- [9] Christian Uhrich, Dissertation: Strategien zur Optimierung organischer Solarzellen,Dresden 2008
- [10] C. Hamann, J. Heim, H. Burghardt Organische Leiter, Halbleiter und Photoleiter,Vieweg, Braunschweig, 1981
- [11] Harald Cholewa, Herstellung und Charakterisierung von organischen

Leuchtdioden mit dotierten Transportschichten an einer Vertikalen

Durchlaufbeschichtungsanlage, TU Graz, 2005

[12] M. Fox. Optical Properties of solids, Oxford Univ. Press, New York, 2001

[13] Matthias Jahnel, Bestimmung charakteristischer Parameter zur Vorhersage von Frühausfällen bei großflächigen organischen Leuchtdioden (OLED),2008

[14] L. S. Hung, C. H. Chen Recent progress of molecular organic electroluminescent materials and devices Materials Science and Engineering, 2002

[15]Martin Punke, Organische Halbleiterbauelemente für Mikrooptische Systeme, Universität Karlsruhe,2007

[16] Michael Hoffmann, Vorlesung organische Halbleiter, Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosystemtechnik (IPMS), 2007

[17] Steffen Jungermann, Vernetzbare Lochtransportpolymere für den Einsatz in organischen Leuchtdioden (OLEDs), Technische Universität München, 2006

[18] Amitabh Banerji, Michael W. Tausch und Ullrich Scherf, Fantastic Plastic Von der Cola-Flasche zur organischen Leuchtdiode,2012

[19] Markus Bäte, Kombinatorische Untersuchung und Optimierung von organischen Multischichtleuchtdioden,2006

[20] Rico Meerheim, Quanteneffizienz und Langzeitstabilität monochromer Organischer Leuchtdioden,S.34,2009

[21] Boris Riedel, Effizienzsteigerung in organischen Leuchtdioden,S.39,2011

[22] http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/alte_seite_du/material/chonline/b31s64.htm

[23] <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/chemie2000plus/material/interactive/download/oled/materialien.jpg>

[24] Wolfgang Brütting, Organische Halbleiter als Bausteine einer kohlenstoffbasierten Elektronik: Möglichkeiten und Grenzen, 2009

[25] Frédéric Laquai, Leuchtende Moleküle - Untersuchungen zur Elektrolumineszenz an Organischen Leuchtdioden, 1999

[26] Organic Electronics, October 2011, S.1683-1694

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prototypen von 40-Zoll-OLED-Fernsehern (730 x 920mm) von Samsung	7
Abbildung 2: <i>OLED-Lampe</i> ^[6]	8
Abbildung 3: <i>Warum OLEDs?</i> ^[1]	9
Abbildung 4: <i>Beispiele für konjugierte Polymere</i> ^[1, S.8]	12
Abbildung 5: <i>sp²-hybridisiertes Atom</i> ^[1, S.5]	13
Abbildung 6: <i>Ethen-Molekül als Beispiel für ein Molekül mit Doppelbindung</i> ^[9]	14
Abbildung 7: <i>Benzol als Beispiel für ein Molekül mit π-Elektronensystem</i> ^[9]	14
Abbildung 8: <i>: links: Ethen-Molekül mit Doppelbindung, rechts: Benzol-Molekül</i>	15
Abbildung 9: <i>Energiebänder HOMO und LUMO im einzelnen Molekül</i>	16
Abbildung 10: <i>Schematische Darstellung einer organischen Leuchtdiode (OLED)</i> . ^[12]	17
Abbildung 11: <i>Flussdiagramm der Funktionsmechanismen</i> ^[14]	18
Abbildung 12: <i>Energieschema einer Einschicht-OLED</i> ^[15]	20
Abbildung 13: <i>Schematische Darstellung der Hüpfprozesse zum Ladungsträgertransport</i>	21
Abbildung 14: <i>Modell des Stromflusses in einer Metallportion</i>	22
Abbildung 15: <i>Modell des Stromflusses in einem konjugierten Polymer</i>	22
Abbildung 16: <i>Schematische Darstellung von Singulett- und Triplett-Excitonen</i> ^[1, S.13]	23
Abbildung 17: <i>Triplett-Emitter-Komplexe mit Schwermetallen als Zentralatom</i>	24
Abbildung 18: <i>Die Elektrolumineszenz in organischen Halbleitermolekülen im Strukturmodell (oben) und Energiestufenmodell (unten)</i> . ^[18]	24
Abbildung 19: <i>Struktur von Tris(8-oxychinolinato)aluminium (Alq₃) und Triarylaminbasis TPD und α-NPB</i> ^[17]	26
Abbildung 20: <i>Schematischer Aufbau und energetische Verhältnisse in einer Zweischicht-Diode mit Elektronentransportschicht (ETL) und Lochtransportschicht (HTL)</i> ^[20]	27
Abbildung 21: <i>Aufbau einer Mehrschicht-OLED</i> ^[12]	28
Abbildung 22: <i>Bandschema einer Mehrschicht-OLED</i>	28
Abbildung 23: <i>Aufbau eines Displays mit Standard-Glas-Verkapselung</i> ^[1, S.12]	29
Abbildung 24: <i>Aufbau eines Displays mit Dünnschicht-Kunststoff-Verkapselung</i>	30
Abbildung 25: <i>Struktur und Emissionsspektrum des Copolymers Superyellow[®] (Merck)</i> ^[21]	33
Abbildung 26: <i>Superyellowlösung und Einwegspritze</i>	33
Abbildung 27: <i>Galinstan in Einwegspritze</i>	34
Abbildung 28: <i>Das ITO-Glas ist einseitig beschichtetes, Elektronen leitfähiges Glas</i>	35
Abbildung 29: <i>Folgende Komponenten benötigt man für den Bau einer Low-Cost OLED</i> ^[23]	35
Abbildung 30: <i>Das ITO- Glas mit Klebefilm</i>	36
Abbildung 31: <i>Bohrmaschine</i>	37
Abbildung 32: <i>Spincoating mit Superyellow</i>	38
Abbildung 33: <i>Die Klebebandschicht für das Galinstan mit Kupferzuleitungen</i>	39
Abbildung 34: <i>Multimeter mit und regelbare Spannungsquelle</i>	40
Abbildung 35: <i>Die Elektrolumineszenz der fertigen OLED beim Anlegen einer Spannung von 9 V</i> . 41	

Abbildung 36: *Messwert und schematisch die IV-Kennlinie*42
Abbildung 37: *(A) Energieniveaus in einer Organischen Leuchtdiode; (B) Lage der Energieniveaus einer OLED unter Einfluss des elektrischen Feldes* ^[25]44
Abbildung 38: *Fowler -Nordheim-Tunnelprozess* ^[25]45
Abbildung 39: *Zeit gegen Luminance Kennlinie* ^[26]46
Abbildung 40: *Der Vergleich der Helligkeit einer OLED nach ein Woche*.....47

Verzeichnis der Abkürzungen

Alq ₃	Tris(8-oxychinolato)aluminium
ETL	Elektronentransportschicht
HOMO	highest occupied molecular orbital
HTL	Löchertransportschicht
HL	Halbleiter
Ir(ppy) ₃	fac-Tris(2-phenylpyridin)iridium
ITO	engl. Indium tin oxide (Indiumzinnoxid)
LED	engl. light-emitting diode(Leuchtdiode)
LUMO	lowest unoccupied molecular orbital
MP3	MPEG-1 or MPEG-2 Audio Layer III
OLED	engl.organic light-emitting diode(Organische Leuchtdiode)
PPV	Poly(p-phenylen-vinylen)
PtOEP	Platinoctaethylporphyrin
UV	ultraviolette Strahlung

Verzeichnis der Symbole

B eine Konstante

eV Elektronenvolt

E_{vac} Vacuumenergie

$E_{\text{e/h}}$ Energie der Elektronen/Löcher

e die Elementarladung

E elektrische Feldstärke

F leicht entzündlich

h die Planck-Konstante

I-U-Kennlinie Strom-Spannungs-Kennlinie

J Stromdichte ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)

m die effektive Masse der Ladungsträger

$P_{\text{e/h}}$ Polarisierungsenergie der Elektronen/Löcher

Xn gesundheitsschädlich

Xi reizend

