

Facharbeit im Leistungskurs Chemie

**Funktionsweise und Aufbau organischer Leuchtdioden und
deren Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen
Leuchtmitteln**

BETRACHTUNG PHYSIKOCHEMISCHER GRUNDLAGEN

CAROLIN KOHL

KURSLEHRER: DR. FRANK NEROWSKI

Inhalt

Danksagung.....	0
Einleitung und Motivation	4
Gliederung der Arbeit	6
Zusammenstellung der verschiedenen OLED Subkategorien	6
Theoretische Grundlagen.....	7
strahlende und nicht strahlende Elektronenübergänge.....	7
Strahlungslose, vibronische Übergänge.....	8
Radiative Übergänge.....	11
Quantenmechanische Betrachtung von Phosphoreszenz und Lumineszenz	11
Funktionsweise und Aufbau.....	15
1.Ladungsträgerinjektion:.....	18
2. Ladungsträgertransport:.....	21
3. Rekombination:.....	24
4. (strahlender) Zerfall der Exzitonen:	26
Farbtuning und „bandgap engineering“	27
Variation des Zentralatoms:	29
Einbringen von Substituenten an den farbgebenden Liganden.	30
Wahl des Sättigungs- und farbgebenden Liganden sowie Wahl des Zentralatoms	33
Lebensdauer und Lösungsansätze für Degradationsprobleme	33
Abschließende Beurteilung und Abgleich mit Herkömmlichen Leuchtmitteln	35
Vorteile gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln:	35
Fazit.....	36
Praktischer Teil: Versuch des Nachbaus einer vereinfachten OLED	37
Grundidee des Aufbaus.....	37
Probleme der praktischen Umsetzung	39
Verbesserung der Konstruktion zur Kontrolle der Galinstanverteilung	44
Mögliche Ursachen für das Ausbleiben der Lichtemission	47
Abschließende Beurteilung des praktischen Teils	48
Literaturverzeichnis	49

Danksagung

Beim Erstellen der Facharbeit konnte ich glücklicherweise auf breite Unterstützung bauen, ohne die die Umsetzung der Facharbeit in dieser Form sicherlich nicht möglich gewesen wäre.

Diese Unterstützung reichte von Fachlehrern in der Schule, die keine Überstunden in der schuleigenen Chemiesammlung scheuten und mich bei der Materialbeschaffung sehr unterstützten bis hin zu der Erlaubnis Vermessungen der selbstgebauten OLEDs während regulärer Unterrichtsstunden durchzuführen. Besonders möchte in diesem Zusammenhang Herrn Dr. Nerowski danken, der mir während des Schreibens durchgehend zur Seite gestanden hat.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Sigurd Höger und seiner Arbeitsgruppe am Kekulé-Institut für Organische Chemie und Biochemie der Universität Bonn. Hier wurde mir und meinen Fragen zur zwei Publikationen mit Beteiligung der Arbeitsgruppe (Chauduri, et al., 2013) und (Aggarwall, et al., 2013) viel Zeit eingeräumt und auch ein Rundgang durch das Labor war ohne Probleme möglich.

Besonders hervorheben möchte ich die große Unterstützung, die ich während meiner einwöchigen Teilnahme am Erlanger SchülerForschungsZentrum der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg in den Osterferien von dortigen Organisatoren und betreuenden Studenten erfahren habe. Ohne das ungebrochene Engagement aller Beteiligten hätte ich die Zeit sicherlich nicht so effektiv nutzen können, um den praktischen Teil dieser Arbeit weiter auszubauen. Dieses Engagement reichte von unermüdlicher Hilfe bei der Beschaffung des Farbstoffes und weiterer Materialien durch unzählige Anrufe und Besuchen in umliegenden Fakultäten über die Möglichkeit, die Werkstatt des physikalischen Institutes mitbenutzen zu dürfen. Auch kostspieligere Anschaffungen waren kein Problem.

Im Zusammenhang mit dem SchülerForschungsZentrum möchte ich vor allem dem Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften herzlich danken, der mir freundlicherweise den recht teuren Emitterfarbstoff SuperYellow® und sogar passende Glassubstrate ohne Gegenleistung zur Verfügung stellte. Darüber hinaus bin ich besonders Andrej Classen gegenüber für Zeit und Mühe zu großem Dank verpflichtet. So konnte ich beispielsweise selbst den Spincoater des Lehrstuhls benutzen und im Reinraum eine der OLEDs zusammen bauen. Auch hat er sich viel Zeit genommen, um sich den geplanten Aufbau

der OLED einmal anzusehen und mir anhand von Messungen und ausführliche Erklärung interessante Einblicke in eines der aktuellen Forschungsgebiete des Lehrstuhls, Solarzellen auf Polymer-Basis, zu bieten. Die den Solarzellen zugrunde liegenden Mechanismen und Phänomene lassen sich zwar in Zusammenhang mit denen der OLED bringen, auf eine weitere Ausführung dieser habe ich jedoch verzichtet, um den Umfang dieser Arbeit nicht zu sprengen.

Abschließend möchte ich noch einmal ein großes Dankeschön für die unerwartet große Unterstützung und den unermüdlichen Einsatz an alle Beteiligten aussprechen.

Einleitung und Motivation

Seit ihrer Einführung in den Elektronikmarkt scheint die OLED (*engl. organic light emitting diode*) die Beleuchtungs- und Elektronikindustrie zu revolutionieren. Unter diesem Kürzel verbirgt sich eine zukunftsweisende Alternative zu herkömmlichen LCD-Bildschirmen und den vielfach verwendeten LEDs. Die neuartige Technologie bedient sich im Gegensatz zu den herkömmlichen Leuchtmitteln lichtemittierender Kunststoffen oder Komplexverbindungen anstelle von Halbmetallen bzw. Flüssigkristallen. In Form von bereits auf dem Markt erhältlichen high-end OLED-Fernsehern und zahlreichen Smartphones mit OLED-Displays hat sie bereits Einzug in den technologischen Alltag gehalten. Zu Recht wie es scheint, denn die OLED kann mit attraktiven Vorteilen in Punkten wie Effizienz, Farbdarstellung und Kontrastschärfe aufwarten. (Neidhart, 2016) Doch das Potential der Konkurrenz der LED scheint noch lange nicht ausgeschöpft zu sein. Angesichts der Möglichkeit, mithilfe von OLEDs in Zukunft einmal flächige, flexible und sogar besonders dünne, aufrollbare Leuchtmittel und Displays serienmäßig herstellen zu können, wird die Forschung in diesem Bereich mit millionenschweren Subventionsgeldern u.a. auch von der deutschen Bundesregierung gefördert. (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)Referat Photonik, 2011 S. 39f) Möglicherweise sind bald leuchtende Fenster und Wände sowie digitale aufrollbare Zeitungen Normalität. Neben den ungeahnten Möglichkeiten, die sicherlich die Herzen von Designern und Innenarchitekten höher schlagen lassen, verdient die OLED auch unter Gesichtspunkten des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit nähere Aufmerksamkeit. Beispielsweise belegte 2014 eine Studie die Verringerung der CO₂ - Emissionen durch Produktion und Verwendung von OLEDs. (Apel, 2013 S. 5) Der vergleichsweise geringere Energieverbrauch verglichen mit herkömmlichen Leuchtmitteln ist hierbei in erster Linie der bei OLEDs durch deren Selbstemissionsfähigkeit entfallenden Hintergrundbeleuchtung geschuldet. (Neidhart, 2016) Vor dem Hintergrund dieses augenscheinlich vielversprechenden Potentials der OLEDs möchte ich mich in dieser Ausarbeitung mit dieser Technologie näher beschäftigen, um abschließend ein differenziertes Fazit hinsichtlich der Vor- und Nachteile im Vergleich zur LED ziehen zu können.

Durch die große Aufmerksamkeit in Medien und Technologie, die die OLED-Technologie zur Zeit erfährt bot sich diese Thema für eine nähere Betrachtung im Rahmen einer Facharbeit an. Hinzu kam, dass die Beschäftigung mit den chemischen und physikalischen Grundlagen meinem großen Interesse auf beiden Gebieten sehr entsprach und so eine interessante Möglichkeit bot, Themengebiete aus beiden Bereichen in die Arbeit mit aufzunehmen. Besonders die Möglichkeit, weitere Recherche zu Farbstoffen in der Chemie, ein Thema das schon früher im Chemieunterricht mein Interesse geweckt hatte, und ebenfalls zu einigen quantenmechanischen Phänomenen anstellen zu können, hat letztendlich den Ausschlag für die Wahl der OLED als Themengebiet der Arbeit gegeben.

Dier erste persönliche Konfrontation mit dem Thema der OLEDs als innovative Lichtquelle erfolgte bei der Recherche vor dem Kauf eines neuen Handys. Hierbei fiel der mir bis dahin unbekannte Begriff OLED in den Werbeversprechen und Produktbeschreibungen ins Auge. Im Laufe der folgenden ersten Internetrecherche stach vor allem die theoretisch mögliche Effizienz von 100% heraus, von der andere Leuchtmittel wie Halogenlampen oder etwa die Glühbirne durch diverse Verluste wie beispielsweise durch Wärme weit entfernt sind. Ein solcher Quantensprung in der Effizienzsteigerung in der Beleuchtungsindustrie stellte besonders angesichts der allgegenwärtigen Bemühungen um Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit eine weitere Motivation zur näheren Auseinandersetzung mit diesem Themengebiet dar.

Gliederung der Arbeit

Zunächst schafft hierfür ein grober Einblick in die verschiedenen Subkategorien der OLED-Technologie einen ersten Überblick und Klärung wichtiger Grundbegriffe. Anschließend folgt eine Betrachtung der Funktionsweise und des Aufbaus der OLEDs, um das nötige Hintergrundwissen für die nachfolgende Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile dieses innovativen Leuchtmittels zu schaffen. Zuletzt steht gemäß der obengenannten Zielsetzung eine abschließende Beurteilung des Potentials der OLED sowie mögliche Ausblicke und vielversprechende Lösungsansätze für derzeitige Probleme.

Zusammenstellung der verschiedenen OLED Subkategorien

Im Bereich der OLEDs lassen sich grob zwei Kategorien anhand der verwendeten Emittersubstanz voneinander abgrenzen. Auf der einen Seite stehen hierbei die sogenannten POLEDs. Diese Abkürzung bezeichnet die sogenannte Polymer-OLED auf Basis eines lichtemittierenden Polymers. Diese sind, wie nachfolgend noch ausführlich dargelegt, jedoch derzeit durch eine sehr niedrige Effizienz gekennzeichnet und momentan noch nicht marktfähig. So sind sämtliche OLEDs in kommerzieller Anwendung der nachfolgend beschriebenen Gruppe der SMOLEDs zuzuordnen. Diese hebt sich durch eine höhere Effizienz von den POLEDs ab. Die SMOLEDs (*engl.: small-molecules OLED*) verwenden Komplexe mit Übergangsmetall-Ionen wie zum Beispiel Iridium als Zentralatom. Aufgrund des durch die höhere Ordnungszahl des Iridiums verursachten Schweratom-effekt handelt es sich bei dieser Kategorie um einen Triplett-Emitter. Eine detailliertere Diskussion dieser Effekte folgt im Zuge der Betrachtung der theoretischen Grundlagen und der Funktionsweise. (Banerji, 2012 S. 13)

Des Weiteren lassen sich diesen farbig leuchtenden OLEDs die White OLED oder kurz WOLED (*engl. white organic light emitting devices*) entgegenstellen. Diese emittieren, wie der Name vermuten lässt, weißes anstelle von farbigem Licht. Hierbei kann innerhalb dieser WOLEDs wiederum in Zweifarbweiß- und Dreifarbweiß-OLEDs unterschieden werden, die entsprechend ihrer Bezeichnung entweder zwei bzw. drei verschiedene

farbige Emitter kombinieren, um gemäß des Prinzips der additiven Farbmischung weißes Licht abzugeben zu können. (Gargouri, 2010 S. 93,109)

Theoretische Grundlagen

strahlende und nicht strahlende Elektronenübergänge

Die Gesamtenergie eines Moleküls setzt sich aus den Komponenten der vibronischen also der Schwingungsenergie E^{vib} einerseits und der elektronischen Energie E^{el} andererseits zusammen:

$$E^{ges} = E^{vib} + E^{el}. \quad (Gl.01)$$

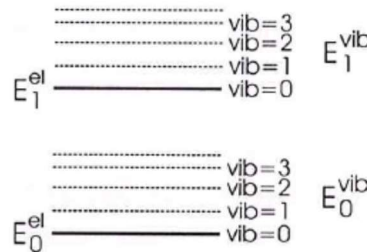


Abbildung 1 : Verteilung vibronischer und elektronischer Energieniveaus im Energiediagramm. Mit wachsender Energie der vibronischen Zustände, also von $vib=0$ bis $vib=3$ nimmt deren Dichte zu.

(Schildknecht, 2006 S. 8)

Durch Anregung beispielsweise mithilfe von Photonen einer ausreichend hohen Frequenz oder wie im Falle der OLED durch elektrischen Strom kann ein Übergang in einen höheren elektronischen und/oder vibronischen Zustand erfolgen. Kehrt nun das Molekül in den Ursprungszustand zurück, erfolgt die Abgabe des Energiebetrages, der der Differenz zwischen angeregtem und ursprünglichem Zustand entspricht, durch strahlungslose und/oder durch strahlende Übergänge. (Gargouri, 2010 S. 15)

Geschieht die Anregung durch Photonen, ist von Photolumineszenz die Rede, während die Elektrolumineszenz Leuchterscheinungen als Folge von elektrischer Anregung umfasst. (Banerji, 2012 S. 6)

Innerhalb der elektronisch angeregten Zustände lässt sich zudem eine Trennlinie zwischen Singulett- und Triplettzuständen ziehen. Diese Unterscheidung ist für die nachfolgenden Kapitel essentiell und soll anhand Abbildung 2 deutlich werden. Beim Singulettzustand, wie auch im Grundzustand, liegen die Elektronenspins gepaart, also antiparallel, vor. Im Triplettzustand hingegen sind beide Elektronenspins parallel

ausgerichtet.¹ Eine ausführlichere Diskussion des Elektronenspins folgt im weiteren Verlauf der Ausführungen.

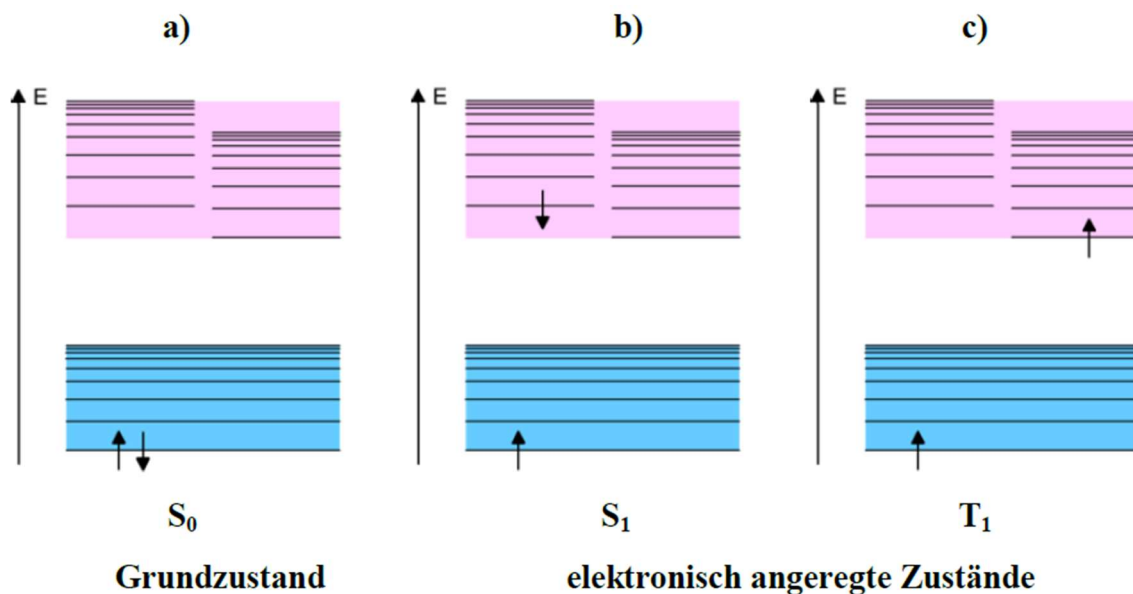


Abbildung 2: Darstellung des Grundzustandes S_0 sowie des Singulettzustandes S_1 mit antiparallelen Spins sowie des Triplettzustandes T_1 mit parallelen Spins
 waagerechte Striche: Energieniveaus
 durchgezogene Pfeile: Elektronenspins

(Banerji, 2012 S. 4)

Strahlungslose, vibronische Übergänge

Unter dem Begriff der strahlungslosen Übergänge werden allgemein solche Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen der Elektronen und Atome bezeichnet, die nicht unter Photonenemission erfolgen.

Die für die nachfolgende Betrachtung wohl am wichtigsten Prozesse dieser Kategorie sind zum einen die Innere Umwandlung (*engl. IC internal conversion*) und die Interkombination (*engl.: ISC intersystem crossing*).

Ersteres bezeichnet die Umwandlung überschüssiger elektronischer Energie durch einen Wechsel in einen energetisch niedrigeren Schwingungszustand des elektronisch angeregten Zustandes. Dies geschieht über Schwingungen des Moleküls und Änderung der Molekülgeometrie d.h. der Kernabstände und der Kernanordnung. Unter Zuhilfenahme der Born-Oppenheimernäherung können die Kerne eines Moleküls

¹ Die Singulettzustände bzw. Triplettzustände werden hierbei mit einem S bzw. T abgekürzt. Das energetische Niveau der Singulett bzw. Triplett-niveaus wird durch laufende Fußzahlen gekennzeichnet. So bezeichnet S_1 beispielsweise den in Abbildung 2 gezeigten ersten angeregten Singulettzustand.

annähernd als ruhend angesehen werden, sodass die Schrödingergleichung zur Zustandsbestimmung des Moleküls nur auf die Elektronenhülle angewendet werden muss. Diese Vereinfachung ist möglich, da die Elektronenmasse um ein Vielfaches geringer als die Kernmasse ist und so vereinfacht eine instantane Reaktion der Elektronen auf die Kernbewegungen angenommen werden kann. So erfordert die Änderung der Kerngeometrie im Gegensatz zur Reaktion der Elektronen auf eine energetische Anhebung deutlich mehr Zeit. Durch äußere Anregung erfolgt meist eine Anhebung in einen höheren Schwingungszustand eines elektronisch angeregten Zustandes, also in ein vom jeweiligen Schwingungsgrundzustand verschiedenes Niveau.

Grund hierfür ist das Frank-Condon-Prinzip, das Übergängen, deren angeregter Zustand eine geringere Änderung der Kerngeometrie erfordert, eine größere Wahrscheinlichkeit zuweist. So erfolgen, die in Abbildung 2 durch vertikale Pfeile verdeutlichten Übergänge mit einer größeren Wahrscheinlichkeit, da hierbei eine geringfügige Änderung des Kernabstands R also der Kerngeometrie nötig ist, die gemäß der oben erwähnten Born-Oppenheimer Näherung signifikant träger erfolgt.

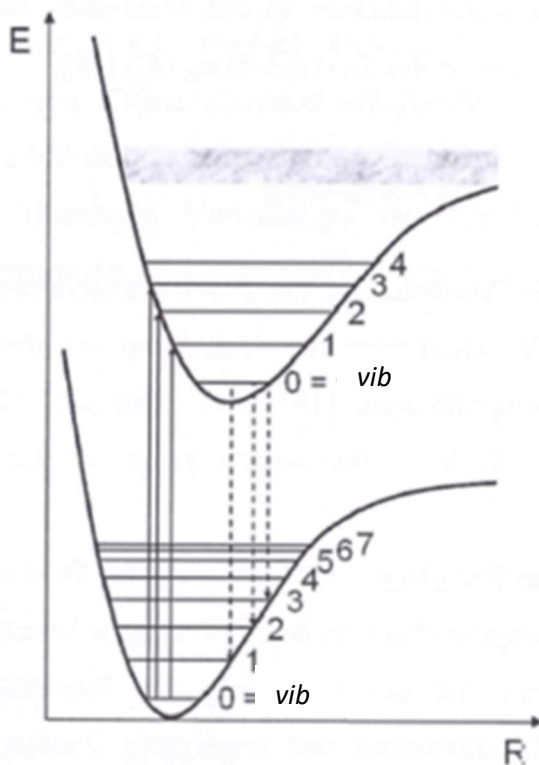


Abbildung 3: Darstellung der durch das Frank-Condon Prinzip: bevorzugten Übergänge durch vertikale Linien.
Auf der x-Achse: Gleichgewichtsabstand der Kerne R
Auf der y-Achse: Energie E .

So Relaxiert beispielsweise ein Elektron im Falle einer Anregung mithilfe von Photonen meist in einen höheren Schwingungszustand des ersten elektronisch angeregten Singulett Zustand S_1 angehoben wird, erst nachfolgend über innere Umwandlung in den energetisch niedrigsten Schwingungszustand des ersten elektronisch angeregten Singulettzustandes $S_1^{vib=0}$. Bei Anregung in höhere elektronisch angeregte Zustände S_n und deren höheren Schwingungszustände erfolgt die innere Umwandlung analog in den Zustand $S_1^{vib=0}$. Gemäß der Regel nach KASHA treten strahlende Übergänge meist aus $S_1^{vib=0}$ auf. (Winaug, 2009 S. 18f)

Durch den zweiten obengenannten Vorgang, die Interkombination ist aber auch ein radiativer Übergang aus dem niedrigsten Schwingungsniveau des ersten elektronisch angeregten Triplettzustandes T_1 möglich.

Die Interkombination benennt Übergänge zwischen zwei elektronisch angeregten Zuständen, die eine Spin-Umkehr erfordern. So können beispielsweise Elektronen aus $S_1^{vib=0}$ in T_1 wechseln, wodurch auch eine strahlenden Relaxation aus diesem Triplettzustand ermöglicht wird.

Dies ist jedoch nur aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung möglich, die nachfolgen in Zusammenhang mit radiativen Übergängen angerissen werden soll. (Winaug, 2009 S. 26f) Der Vorgang der Interkombination soll hier nur der Vollständigkeit halber einmal erwähnt werden und wird im nächsten Kapitel ausführlicher dargelegt.

Zusammengefasst erfolgt also im Vorfeld eines strahlenden Übergangs zunächst die Relaxation des Moleküls in einen energetisch günstigeren Zustand über strahlungslose Prozesse wie innere Umwandlung (ohne Spin-Umkehr) und Interkombination (Spin-Umkehr), bevor beim Zurückkehren in den Ursprungszustand die restliche Energiedifferenz durch Photonenemission abgegeben wird. Hierbei ist die Energie des emittierten Photons im Vergleich zu der des absorbierten Photons geringer, da bereits ein Teil der vom Molekül aufgenommenen Energie über die beiden beschriebenen strahlungslosen Prozesse abgegeben wurde. Diese so entstehende Verschiebung der Wellenlänge des Photons hin zu energieärmeren, langwelligerem, röterem Licht wird auch als Stokes-Shift bezeichnet. Durch diese Wellenlängenverschiebung wird die Emittersubstanz für das emittierte Licht transparent, da dieses nun nicht mehr ausreichend Energie besitzt, um die Moleküle erneut anzuregen. (Schildknecht, 2006 S. 13)

Radiative Übergänge

Radiative Übergänge allgemein lassen sich grob anhand ihrer Lebensdauer in zwei unterschiedliche Leuchterscheinungen unterscheiden. Während sich die Vorgänge der Fluoreszenz bereits im Nanosekundenbereich abspielen, ist bei der Phosphoreszenz eine Verzögerung, ein Nachleuchten, bis hin zu einigen Sekunden nach der Anregung zu beobachten. Dies lässt sich auf quantenmechanische Prozesse zurückführen, die im Anschluss grob skizziert werden sollen. (Schildknecht, 2006 S. 15)

Quantenmechanische Betrachtung von Phosphoreszenz und Lumineszenz

Zentraler Aspekt dieser Betrachtung ist die Multiplizität M . Diese Größe weist starke Korrelationen mit dem Spin der Elektronen, auf. Obwohl die Wirkung dieser intrinsischen Eigenschaft des Spins sich in mancher Hinsicht mit der eines Drehimpulses um die eigene Achse vergleichen lässt, existiert streng genommen kein physikalisch vertretbares Analogon in der klassischen Mechanik. Wie der Bahndrehimpuls ist auch der Spin quantisiert, sodass die entsprechende Quantenzahl, Spinquantenzahl s genannt, nur diskrete Werte annehmen kann. Für Elektronen ist der einzig zulässige Wert für $s = \frac{1}{2}$

Neben der Spinquantenzahl ist auch die z-Komponente des Spins, als m_s oder auch M_s bezeichnet, zur Beschreibung der Ausrichtung entlang der z-Achse relevant. Die möglichen Werte für m_s sind hierbei auf $s = \frac{1}{2}$ (spin-up) oder $s = -\frac{1}{2}$ (spin-down) beschränkt. Die z-Achse wird dabei willkürlich, meist entlang eines angelegten Magnetfeldes, gelegt. (Holzner, 2015 S. 167-171), (Douglas, 2010 S. 1365)

Aus den beschriebenen Größen lässt sich nun eine zur Betrachtung von Phosphoreszenz und Fluoreszenz fundamentale Größe, die Multiplizität M , ableiten:

$$M=2S+1. \quad (\text{Gl.02})$$

(Winaug, 2009 S. 16)

Hierbei ist S der Gesamtspin, also die Summe der Werte für m_s , der einzelnen Elektronenspins. Liegen die Spins gepaart, also antiparallel vor, so ist $S=0 = \frac{1}{2} + (-\frac{1}{2})$

(Singulettzustand). Bei einer parallelen, ungepaarten Anordnung (Triplettzustand) nimmt S hingegen einen von Null verschiedenen Wert an.

Anhand dieser Multiplizitätswerte lassen sich Auswahlregeln für Übergänge der Elektronen zwischen den verschiedenen Zuständen aufstellen, die deren Wahrscheinlichkeit quantenmechanisch beschreiben können. Diese Auswahlregeln beruhen im Grunde auf der Erhaltung des Gesamtdrehimpulses der Elektronen, der Vektorsumme aus Eigendrehimpuls, beschrieben durch s , und dem Bahndrehimpuls beschrieben durch die magnetquantenzahl l . Da hierbei s nur den Wert $s = \frac{1}{2}$ für alle Elektronen annehmen kann, kann die Änderung von l um $\Delta l = \pm \frac{1}{2}$ ohne die Spin-Bahnkopplung nicht durch eine entsprechende Änderung von s um denselben Betrag kompensiert werden. Somit kann die geforderte Erhaltung des Gesamtdrehimpulses und der Multiplizität ohne Spin-Bahn-Kopplung nicht gewährleistet werden. So sind laut diesen Auswahlregeln Übergänge, bei denen die Multiplizität erhalten bleibt, als spin-erlaubte, die bei denen sich die Multiplizität ändert, als spin-verbotene Übergänge kategorisiert.

Die sogenannten spin-verbotenen Übergänge, beispielsweise vom Singulett ($M = 0$) in den Triplettzustand ($M = 1$) sind entgegen ihrer Bezeichnung immerhin noch in geringem Ausmaß bei Atomen höherer Ordnungszahlen wie z.B. Iridium zu beobachten. Grund hierfür ist die bereits vielfach erwähnte Spin-Bahn-Kopplung, auch Schweratomeffekt genannt. Dieser Effekt beschreibt die Wechselwirkung des Bahndrehimpulses und des Spins des Elektrons. Für genauere physikalische Beschreibung dieser Korrelation sei auf weiterführende Fachliteratur wie (Meschede, 2004 S. 674) verwiesen. Diese Wechselwirkung aufgrund der unterschiedlichen Spins führt zu einer Auffächerung der Energieniveaus der Elektronen im selben Orbital. Dies wird auch als Feinstrukturauffächerung H_{SO} bezeichnet und ist gegeben durch :

$$H_{SO} \propto \frac{Z^4}{n^3}, \quad (\text{Gl.03})$$

wobei Z die Kernladungszahl und n die Hauptquantenzahl bezeichnet. (Winaug, 2009 S. 20f)

Wie aus der Formel abzulesen, nimmt dieser Effekt mit steigender Kernladungszahl Z zu. Besonders ausgeprägt ist die Spin-Bahn-Kopplung bei Komplexen mit Übergangsmetallen als Zentralatomen. So werden durch die Spin-Bahn-Kopplung auch

eigentlich spin-verbotene Übergänge, sogenannte Interkombinationen oder ISC (*engl.: intersystem crossing*), bis zu einem gewissen Maße erlaubt, sodass auch eine Rückkehr aus dem Triplettzustand in den Grundzustand ermöglicht wird, welcher eine antiparallele Spinausrichtung aufweist. (Gargouri, 2010 S. 16f) Ein Erklärungsversuch hierfür ist die durch besagten Effekt hervorgerufene Mischung der verschiedenen Multiplizitätszustände. So erhält der Singulettzustand auch zu einem bestimmten Grad Triplettcharakter und umgekehrt, sodass das Verbot von Übergängen in einen Zustand anderer Multiplizität etwas abgeschwächt wird. (Schildknecht, 2006 S. 18)

Somit steigt die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs aus einem Singulettzustand in einen Triplettzustand mit zunehmender Spin-Bahn-Kopplung an, sodass nun aus insgesamt vier Zuständen, d.h. einem Singulett und drei Triplettzuständen, die sich durch den Wert von m_s voneinander unterscheiden, eine Photonenemission erfolgen kann. Gleichzeitiges Auftreten von Fluoreszenz und Phosphoreszenz wird jedoch meist nicht beobachtet, da im Falle einer ausreichend ausgeprägten Spin-Bahn-Kopplung die Singulettzustände über Interkombination in Triplettzustände umgewandelt werden und so bei den allermeisten Triplett emittenten ausschließlich Phosphoreszenz zu beobachten ist.

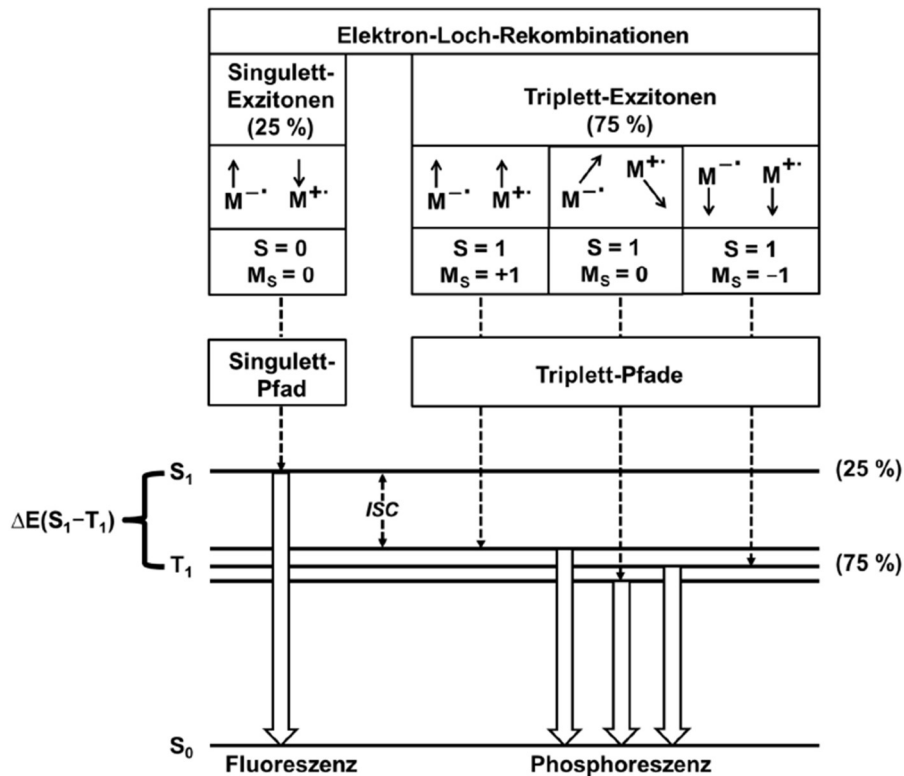


Abbildung 4: mögliche Übergänge aus elektronisch angeregten Zuständen in den Grundzustand S_0 .
M: Ladungsträger mit durch einen durchgezogenem Pfeil symbolisierte z-Komponente des Spins (m_s wird hier M_s genannt)
S: Gesamtspin
gestrichelte Pfeile: mögliche Relaxationspfade in den Grundzustand
ISC: intersystem crossing, Interkombination

(Gneuß, 2015 S. 11)

Bei organischen Emittermaterialien wird die Quantenausbeute aufgrund einer kaum ausgeprägten Spin-Bahn-Kopplung auf maximal 25 % begrenzt, da hier nur Emission aus einem der insgesamt vier möglichen Zustände, dem Singulettzustand, möglich ist...² Die Energiedifferenz zwischen Tripletzustand T_1 und Grundzustand S_0 des Moleküls ist aufgrund der bei der Spin-Paarung freiwerdende Energie, der Spin-Paarungsenergie,

² Die Anregung mithilfe von Photonen erfolgt in der Mehrzahl der Fälle in einen Singulettzustand. Grund hierfür ist, dass dieser Übergang im Gegensatz zu einer Anhebung aus dem Grundzustand in einen Tripletzustand einen spin-verbotenen Übergang darstellt und somit weniger wahrscheinlich ist. Das Prinzip der spin-verbotenen Übergänge findet im nachfolgenden Kapitel Erwähnung. Im Falle einer Anregung durch elektrischen Strom sind hingegen alle vier Möglichkeiten gleich wahrscheinlich, sodass sich der Singulettzustand und die drei in Abbildung 4 gezeigten drei verschiedenen Tripletzustände jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % bilden. Da bei POLEDs keine Spin-Bahnkopplung vorliegt, die einen strahlenden Übergang von Tripletzuständen ermöglicht, relaxieren die Tripletzustände strahlungslos, was die theoretisch erreichbare Effizienz von POLEDs auf 25 % beschränkt. (Schildknecht, 2006 S. 19)

etwas geringer als die Differenz zwischen dem entsprechenden Singulettzustand S_1 und Grundzustand. (Banerji, 2012 S. 3f) Aus diesem Grund sind auch in Abbildung 2 die durch vertikale Striche dargestellten Energieniveaus der Tripletzustände etwas näher am Grundzustand gezeichnet als die energetischen Niveaus der entsprechenden Singulettzustände.

Funktionsweise und Aufbau

In der OLED-Technologie wird nun das obenbeschriebene Prinzip der Lichtemission bei der Rückkehr eines Elektrons aus einem angeregten Zustand in einen energetisch niedrigeren zur Entwicklung einer neuen Generation von Leuchtmitteln verwendet.

In ihrer grundlegendsten Ausführung besteht eine OLED aus zwei Elektroden, die die Emitterschicht EML (*engl.: emission layer*) einschließen. Hierbei wird eine auf einem Glassubstrat angebrachte meist aus einem optisch transparenten und elektrisch leitfähigen Oxid wie Iridium-Zink-Oxid (ITO: *engl.: indium-tin oxide*) bestehende Anode verwendet, um den Austritt des emittierten Lichts zu gewährleisten. Durch die an den Elektroden angelegte Spannung werden einerseits an der Anode Elektronen aus dem LUMO (*engl. lowest unoccupied molecular orbital*) der angrenzenden funktionellen Schicht in das HOMO (*engl. highest occupied molecular orbital*) der Anode übertragen, an der Kathode hingegen Elektronen vom LUMO der Elektrode in das HOMO der entsprechend angrenzenden Schicht transportiert. Diese parallel ablaufenden Prozesse werden auch als Ladungsträgerinjektion bezeichnet. Die so initiierten Löcher, die fehlenden Elektronen im LUMO auch Defektelektronen genannt, und die ins HOMO eingefügten zusätzlichen Elektronen, wandern nun getrieben von der äußeren an den Elektroden anliegenden Spannung aufeinander zu. Beim Zusammentreffen bildet sich ein Elektron-Loch-Paar, auch Exziton genannt. Es liegt folglich zum Einen ein Defektelektron im HOMO als auch ein zusätzliches Elektron im LOMO eines Moleküls vor. Bei der Deaktivierung des Exzitons wechselt das Elektron aus dem LUMO in die Position des Defektelektrons und emittiert im Idealfall ein Photon entsprechender Wellenlänge. (Winaug, 2009 S. 37f)

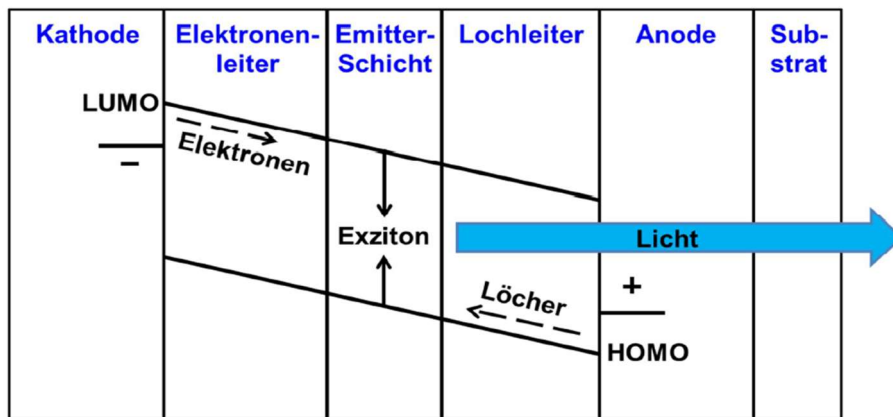


Abbildung 5: Funktionsprinzip einer OLED

Die Veränderung der potencie des HOMO und LUMO innerhalb der OLED wird durch das von außen angelegte Feld hervorgerufen. Diese Potentialänderung äußert sich durch die Neigung der Geraden in der Abbildung.

(Gneuß, 2015 S. 9)

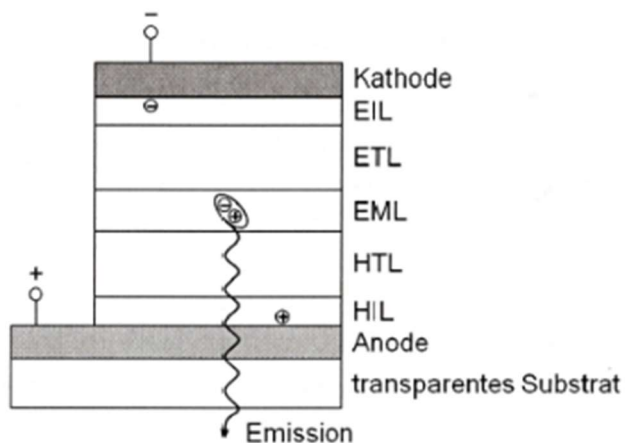


Abbildung 6: Aufbau einer OLED

EIL: electron injection layer (Injektion von Elektronen)

ETL: electron transport layer (Transport der Elektronen)

EML: emission layer (Emittiermaterial)

HTL: hole transport layer (-transport der Löcher/Defektelektronen)

HIL: hole injection layer (Injektion von Löchern/Defektelektronen)

(Winaug, 2009 S. 36)

Zur Effizienzsteigerung kann dieser Grundaufbau um verschieden funktionale Schichten zwischen der Emitterschicht und den Elektroden ergänzt werden. So transportieren beispielsweise Elektronen- und Loch-Transportschichten ETL bzw. HTL (*engl.: electron transport layer bzw. hole transport layer*) die Ladungsträger in die Emitterschicht, während Blockerschichten zwischen EML und ETL bzw. EML und HTL das strahlungslose Löschen der Exzitonen verhindern. (Winaug, 2009 S. 38), (Banerji, 2012 S. 26)

Des Weiteren kann durch den Einsatz von mehreren Transportschichten hintereinander die Energiebarriere in mehrere kleinere Barrieren aufgeteilt werden, was zu einer

Verringerung der benötigten minimalen Spannung führt und den Betrieb der OLED auch bei geringerer Spannung ermöglicht. (Banerji, 2012 S. 24)

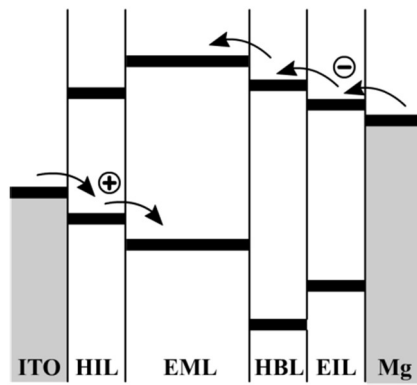


Abbildung 7: Verringerung der benötigten Betriebsspannung durch Aufteilen der Injektionsbarrieren
HBL: hole-blocking-layer (Blockerschicht für Löcher)

(Banerji, 2012 S. 25)

Die Lichterzeugung lässt sich hierbei in vier aufeinander folgende Phasen unterteilen.:

- 1. Ladungsträgerinjektion ,**
- 2. Ladungsträgertransport,**
- 3. Rekombination**
- 4. Zerfall oder strahlende Rekombination**

(Gargouri, 2010 S. 22f), (Winaug, 2009 S. 38f)

1. Ladungsträgerinjektion:

Wie oben bereits angerissen handelt es sich bei diesem Schritt im Wesentlichen um die Ausbildung einer Radikalkations bzw. Radikalanions in der Polymerschicht durch das Anlegen einer äußeren Spannung. Vereinfacht ergibt sich gemäß der Mottky-Schott-Relation und Abbildung 7 die Energiebarriere der Elektronen- bzw. Lochinjektion $\Phi_{B,e}$ bzw. $\Phi_{B,h}$ aus der Differenz der Austrittsarbeit der Kathode Φ_M und der Elektronenaffinität E_A der Polymerschicht. Analog dazu kann die Energiebarriere zur Lochinjektion durch die Differenz des Ionisierungspotentials I_P der Polymerschicht und der Austrittsarbeit des Elektrodenmetalls errechnet werden:

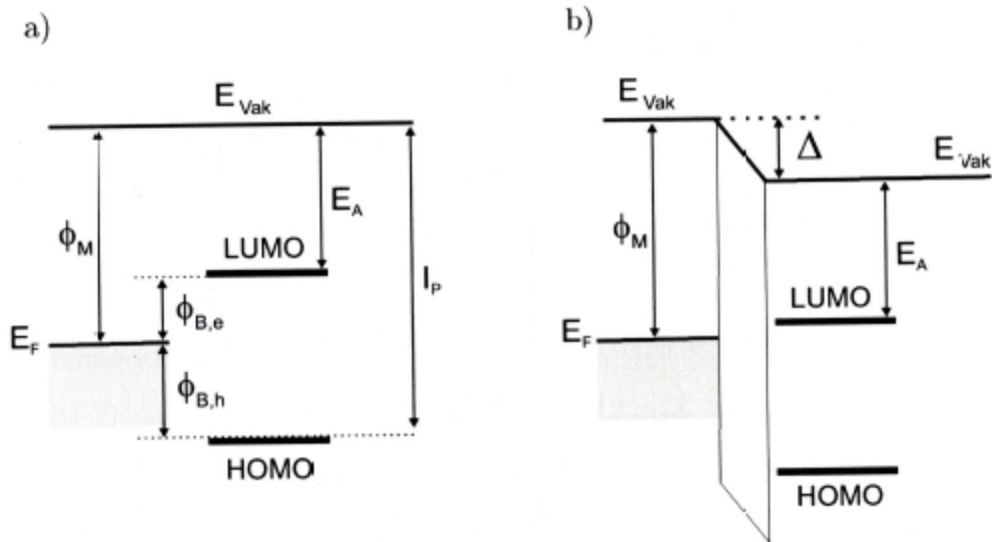


Abbildung 8:

a) Annahme eines über die Grenzfläche konstantes Vakuumniveaus und damit Annahme der Gültigkeit der Schottky-Mott-Relation (siehe Gl.04 und Gl.05)

b) anti-Schottky-Mott-Regel: Änderung der Energiebarriere durch die Ausbildung eines Grenzflächendipols Δ . Während sich die Injektionsbarriere für Elektronen $\Phi_{B,e}$ verkleinert, wächst die für Löcher $\Phi_{B,h}$ an. Dies wird in der Abbildung am verringerten Abstand von E_F und LUMO sowie an einem vergrößerten energetischen Abstand von E_F und HOMO deutlich.

E_{vak} bezeichnet das Niveau freier Elektronen (Thuselt, 2011 S. 258)

I_P : Ionisierungspotential der Polymerschicht

E_A : Elektronenaffinität der Polymerschicht, d.h. energetische Differenz zwischen Vakuumniveau des Polymers und Leitungsband des Polymers (Thuselt, 2011 S. 258)

E_F : Fermienergie, d.h. höchstes mit Elektronen besetztes energetische Niveau (Thuselt, 2011 S. 258)

Φ_M : Austrittsarbeit der Kathode (Thuselt, 2011 S. 258)

$$\Phi_{B,e} = \Phi_M - E_A \quad (\text{Elektroneninjektion}) \quad (\text{Gl.04})$$

$$\Phi_{B,h} = - I_P - \Phi_M \quad (\text{Lochinjektion}) \quad (\text{Gl.05})$$

(Gargouri, 2010 S. 24)

Die bei der Anwendung der Schottky-Mott-Regel vorausgesetzte Angleichung des Vakuumniveaus des Elektrodenmetalls und der angrenzenden Schicht konnte jedoch nicht bestätigt werden. Das Vakuumniveau bezeichnet hierbei das energetische Niveau freier Elektronen. (Thuselt, 2011 S. 258) Somit kommt es zu einer energetischen Verschiebung des Fermienergie, hier das höchste im Metall mit Elektronen besetzte Energieniveau, in Relation zum LUMO der angrenzenden Schicht. Hauptursache hierfür ist die Ausbildung einer Dipolschicht im Polymer an der Grenzfläche zur Elektrode.

Dies vergrößert einerseits die Energiebarriere für die Lochinjektion, da nun wie auch in Abbildung 8 gezeigt das Niveau des HOMO in Abbildung 8b) im Vergleich zu Abbildung 8a) deutlich weiter unten, weiter vom Fermi-niveau E_F entfernt liegt. Analog dazu veranschaulicht das in Abbildung 8b) näher am E_F gelegene LUMO die Reduktion der Injektionsbarriere für Elektronen.

Die nötige Energie zum Überwinden der beschriebenen Energiebarrieren kann einerseits im Falle der sogenannten thermionischen Injektion durch thermische Anregung oder im Zuge der Tunnelinjektion bereitgestellt werden. (Schildknecht, 2006 S. 32f)

Letzteres ist im Zusammenhang mit dem quantenmechanischen Phänomen des Tunneleffektes zu sehen, der besagt, dass ein Elementarteilchen sich mit einer von Null verschiedenen Wahrscheinlichkeit trotz nach dem Verständnis der klassischen Physik zu geringer Energie eine Potentialbarriere überwinden, diese also durchtunneln, kann. (Ibach, 2002 S. 327)

Mit dem Ziel den Prozess der Ladungsinjektion mit möglichst wenig Energie betreiben zu können, werden bevorzugt unedle Elektrodenmaterialien mit einer geringen Austrittsarbeit, die eine möglichst kleine Energiedifferenz zum LUMO der angrenzenden Polymerschicht aufweist, eingesetzt. (Banerji, 2012 S. 22f)

2. Ladungsträgertransport:

Der Transport der Ladungsträger lässt sich vereinfacht als Weitergabe der Elektronen bzw. Löcher durch eine Abfolge vollständig reversibler Oxidations- und Reduktionsprozesse der Transportmoleküle auffassen.

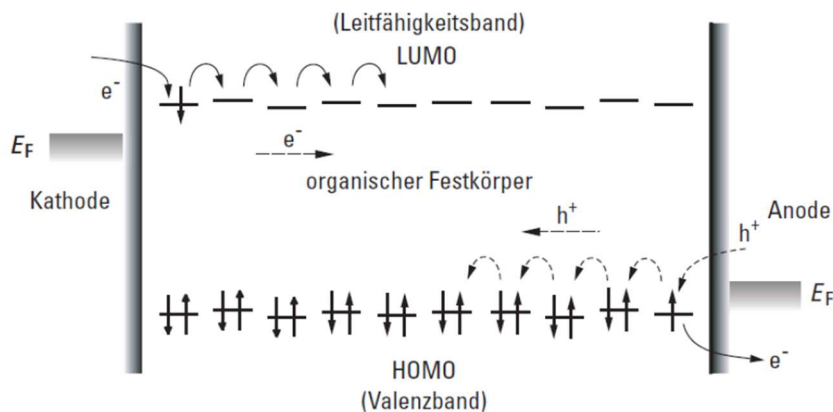


Abbildung 9: Ladungstransport über Oxidations- und Reduktionsprozesse in der OLED

Die variierende Höhe der Energieniveaus, dargestellt durch waagerechte Striche, verdeutlicht deren uneinheitliche Höhe, die einer statistischen Verteilung unterliegt („Bässler Modell“)

E_F : Fermi-niveau

durchgezogene, gerade Pfeile: Elektronenspins

durchgezogene, gebogenen Pfeile: Elektronenübertragung

e^- : Elektronen

h^+ : Löcher

(Gneuß, 2015 S. 10)

Der Austausch von Ladungsträgern zwischen den Molekülen wird hierbei mithilfe des Hopping-Mechanismus durch sprungartige Fortbewegung von einem Molekül zum nächsten beschrieben. Die Höhe der dabei zu überwindenden Energiebarriere wird maßgeblich durch den Abstand und die Orientierung der Moleküle bestimmt. Im Hopping-Modell wird die Verteilung der HOMO und LUMO Energieniveaus mithilfe einer Gaußverteilung modelliert. Diese statistische Verteilung lässt sich mit Verunreinigungen und strukturelle Veränderungen wie aus der Ebene gedrehte Molekülbereiche begründen, die zu einer uneinheitlichen energetischen Verteilung der auf den Molekülen delokalisierten Ladungsträgern führen. Diese Gaußverteilung der HOMO und LUMO-Niveaus überträgt sich so ebenfalls auf die Hüpfwahrscheinlichkeiten dieser Ladungsträger. (Riedel, 2011 S. 18)

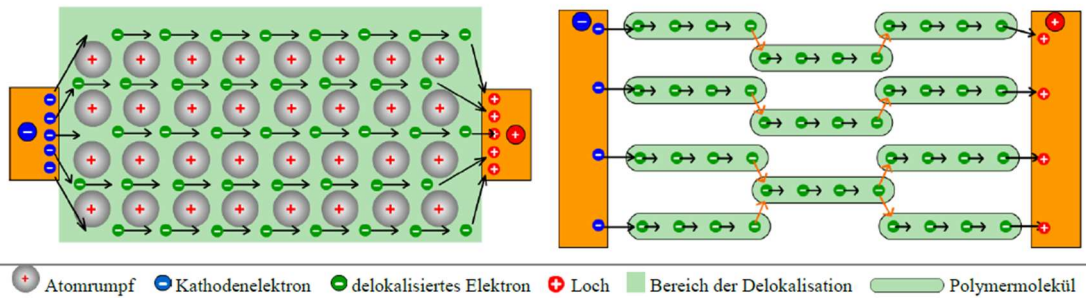


Abbildung 10: Vergleich der Ladungsträgertransportmechanismen in einem Metall und einer organischen Polymerschicht

links: Beim Transport in einem Metall wird nur eine geringe Kontaktfläche zu den Elektroden benötigt. Die Elektronen sind in der Stoffportion frei beweglich

rechts: Der Ladungsträgertransport in einer Polymerschicht muss über Hüpffprozess zwischen den Polymermolekülen (orangene Pfeile) erfolgen, da die Elektronen nur innerhalb der Moleküle delokalisiert vorliegen.

(Banerji, 2012 S. 11)

Die Hüpftrate eines Ladungsträgers v_{ij} lässt sich gemäß folgender Formel mathematisch beschreiben:

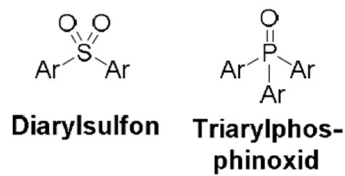
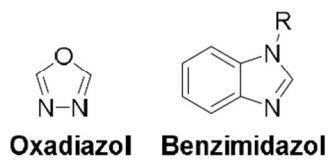
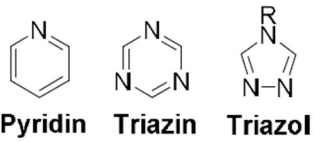
$$v_{ij} = v_0 \exp(-2\Delta R_{ij}) \begin{cases} \exp\left(-\frac{E_j - E_i - qF(x_j - x_i)}{k_B T}\right) & \text{für } E_j > E_i \\ 1 & \text{für } E_j \leq E_i \end{cases} \quad (\text{Gl.06})$$

Hierbei steht v_0 für die sogenannte attempt-to-escape Frequenz, die die Frequenz beziffert, mit der das Elektron versucht von seinem lokalisierten Zustand i mit der Energie E_i in den nächsten lokalisierten Zustand j mit der Energie E_j zu wechseln. Das Feld F bewirkt zu dem eine Erniedrigung der energetischen Differenz der beiden Zustände. (Gargouri, 2010 S. 12) Des Weiteren steht ΔR_{ij} für den Betrag der räumlich Entfernung der beiden Zustände. Im Falle eines Wechsels in einen energetisch Höheren Zustand beschreibt der Boltzmann Term, der Term oben hinter der geschweiften Klammer, den Einfluss des Energieunterschieds. Diese Beschränkung gilt jedoch nur für den Fall $E_j > E_i$.

Innerhalb der Moleküle selbst erfolgt der Ladungstransport hingegen über das delokalisierte π -Elektronensystem. Die in der ETL bzw. HTL verwendeten Elektron- bzw. Lochtransporterschichten müssen hierfür in der Lage sein, die entstehenden Radikalanionen bzw. Radikationen durch ihre Molekülstruktur zu stabilisieren. So weisen Elektrontransportmoleküle neben elektronenaffinen aromatischen Strukturelementen meist elektronenziehende Gruppen (*EWGs*: engl.: *electron withdrawing groups*) wie Pyridin, Triazin, Triazol (siehe Abbildung 11) auf. Die Lochtransporterschichten zeichnen sich hingegen vor allem durch einen Elektronenreichtum der aromatischen Strukturen,

deren niedrige Elektronenaffinität und elektronenschiebende Elemente (*EDGs engl: electron donating groups*) wie Diphenylamin und Triphenylamin aus. (siehe Abbildung 12)

Typische EWGs



Beispiele für Elektronenleiter

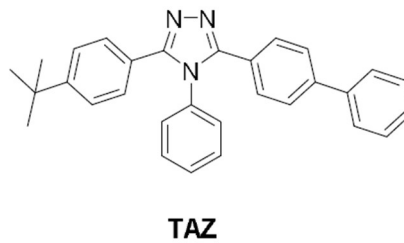
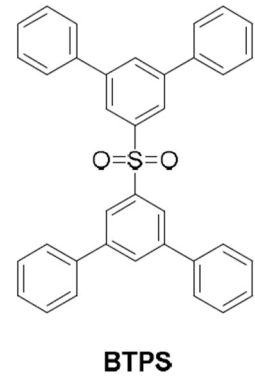
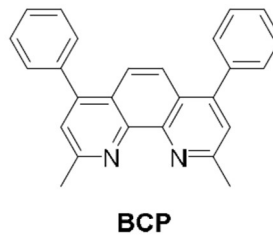
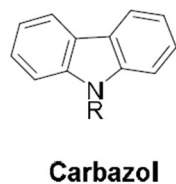
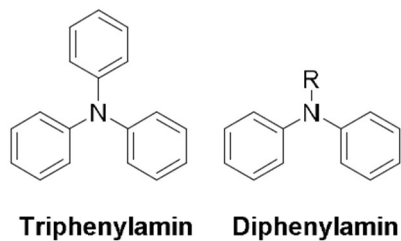


Abbildung 11:
links: typische elektronenziehende Gruppen
rechts: Beispiele für Materialien der Elektronentransportschicht

Typische EDGs



Beispiele für Lochleiter

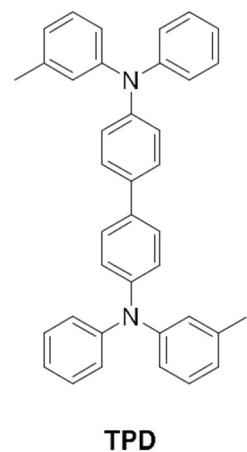
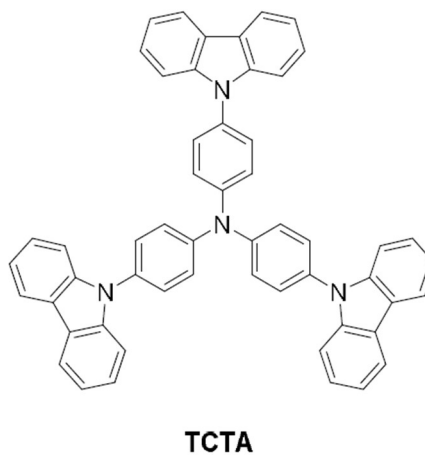


Abbildung 12:
links: typische elektronenschiebende Gruppen
rechts: Beispiele für Materialien der Lochtransportschicht

(Gneuß, 2015 S. 5f)

Im Falle der SMOLEDs befinden sich auch innerhalb der EML vorwiegend für den Ladungstransport zuständige Spezies, als Matrix bezeichnet. Durch die Verwendung dieser Matrix-Materialien, die mit Emittiermolekülen dotiert sind, wird eine Effizienzsteigerung erreicht, da so dem Konzentrationsquenching, entgegen gewirkt werden kann. Konzentrationsquenching, hier durch Triplett-Triplett-Annihilation, beschreibt die strahlungslose Relaxation von Triplettzuständen in den Grundzustand als Folge gegenseitiger Wechselwirkung der Triplettzustände. Diese gegenseitige Auslöschung nimmt bei Triplett-Emittieren wie SMOLEDs verglichen mit Fluoreszenzemittieren ungleich größere Ausmaße an. Grund hierfür ist die bei spinverbotenen strahlenden Übergängen aus einem Triplett- in den Grundzustand deutlich größere Lebensdauer. Die so länger vorliegenden Triplettzustände haben somit deutlich mehr Zeit, miteinander zu annihilieren als die vergleichsweise schneller relaxierenden Singulettzustände.³ (Winaug, 2009 S. 34f) Die im nächsten Abschnitt beschriebene Rekombination kann bestenfalls auf einem Matrixmolekül erfolgen und anschließend auf das Emittiermolekül übertragen werden, um dort unter Photonenemission zu zerfallen. Hierfür ist eine möglichst kleine energetische Differenz zu den angrenzenden Molekülorbitalen des Emittiermaterials unabdingbar. (Winaug, 2009 S. 40) Um dem Anspruch der Leitfähigkeit für einen bipolaren Strom aus zwei unterschiedlich geladenen Ladungsträgern und dem Anspruch der effizienten Elektronenübertragung auf die Emittiersubstanz gerecht zu werden, müssen die Matrixmaterialien ebenfalls aufgrund von elektronenschiebender und elektronenziehender Gruppen bipolar sein. (Gneuß, 2015 S. 6)

3. Rekombination:

Aufgrund der geringen meist nur auf den vergleichsweise schwachen Van-der-Waals-Bindungen beruhenden Wechselwirkung zwischen den Molekülen ist die Rekombination zweier entgegengesetzter Ladungsträger auf den relativ geringen sogenannten Coulomb-Radius r beschränkt. Mit diesem sehr reduzierten Radius sind die in OLEDs verwendeten Exzitonen als Frenkel-Exzitonen zu klassifizieren. Der Coulomb- Radius r ist hierbei gegeben durch:

³ Die Lebensdauer bezeichnet hierbei die Zeit zwischen Entstehung des angeregten Triplettzustandes und dessen Relaxation in den Grundzustand.

$$r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 k_B T} \quad (\text{Gl.07})$$

(Gargouri, 2010 S. 32f), (Birnstock, 2003 S. 24f)

Hierbei steht e für die Elementarladung, ϵ_0 als elektrische Feldkonstante, ϵ für die Dielektrizitätszahl, k_B für die Boltzmannkonstante und T für die Temperatur in K

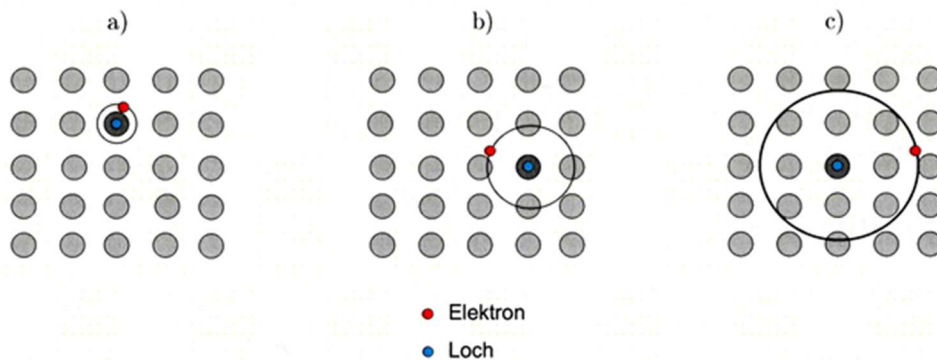


Abbildung 13: Verschiedene Arten von Exzitonen

a) Frenkel-Exziton: Das Exziton ist durch die kleine Dielektrizitätszahl der meisten organischen Halbleiter von $\epsilon = 3$ relativ klein. Hieraus resultiert eine vergleichsweise starke Coulomb-Wechselwirkung und damit ein kleiner Exzitonradius.

b) Charge-Transfer-Exzitonen: Ladungsträger sind nur wenige Moleküle voneinander entfernt. Durch Hüpfprozesse können sie sich weiter annähern und schließlich ein Frenkel-Exziton bilden

c) Wannier-Mott-Exziton: Die in anorganischen Halbleitern vergleichsweise hohe Dielektrizitätszahl bedingt eine schwächere Coulomb-Wechselwirkung und so einen größeren Exzitonradius. Mit etwa 10 nm ist dieser Radius um einiges größer als die Atomabstände im anorganischen Festkörper.

(Gargouri, 2010 S. 13)

Eine wichtige Kenngröße für die Funktionalität und Effizienz von OLED ist die Rekombinationseffizienz $R(x)$. Diese korreliert gemäß der Relation

$$R(x) = \gamma \cdot n(x) \cdot p(x) \quad (\text{Gl.08})$$

(Gargouri, 2010 S. 33)

mit den Ladungsträgerdichten $n(x)$ und $p(x)$ und dem der Konstante γ , die sich aus den Ladungsträgerbeweglichkeiten für Löcher und Elektronen berechnen lässt. Die Rekombinationseffizienz wird für identische Ladungsträgerdichten, also für den Fall einer optimalen Ladungsträger-Balance mit $n=p$, maximal. (Gargouri, 2010 S. 33)

Angesichts der meist höheren Transportfähigkeit der meisten Polymere für Defektelektronen, werden häufig zusätzlich die bereits erwähnten Blockerschichten verbaut. Dies zeichnen sich im Falle der HBLs (*engl. hole blocking layer*) durch ein

energetisch niedrig gelegenen HOMO aus, in das die Defektelektronen aufgrund einer hohen Energiebarriere nicht gelangen können und so vom Durchqueren der Emitterschicht und strahlungslosen Energieabgabe an der Kathode abgehalten wird. Gefangen in der Emitterschicht stehen sie so länger für strahlende Zerfallsprozesse zur Verfügung. Die Blockerschichten für Elektronen weisen anstelle eines tief gelegenen HOMOs ein energetisch hohes LUMO auf, was analog mittels einer hohen Energiebarriere den weiteren Transport von Elektronen aus der Emitterschicht und damit aus der Rekombinationskurve, d.h. der Zone, in dem sich die strahlenden Zerfälle hauptsächlich ereignen, unterbindet. Da nur eine Rekombination auf einem Emittiermolekül zur Lichterzeugung beiträgt, sind Exzitonen bzw. Ladungsträger, die nicht innerhalb der Rekombinationszone zerfallen bzw. zu einem strahlenden Übergang beitragen, für die Leuchtwirkung der OLED nutzlos und somit unerwünscht. (Banerji, 2012 S. 26)

4. (strahlender) Zerfall der Exzitonen:

Wie bereits oben angedeutet bezeichnet der Begriff der Rekombination das Zusammentreffen von initiierten Elektronen im LUMO und Löchern im HOMO eines Moleküls. Die Wahrscheinlichkeit eines strahlenden Übergangs wird durch die Quantenausbeute Φ_F beziffert und ist gegeben durch:

$$\Phi_F = \frac{k_s}{k_s + k_{ns}} \quad (\text{Gl.10})$$

Hierbei stehen k_s und k_{ns} für die Geschwindigkeitskonstanten der strahlenden bzw. nicht strahlenden Übergänge. Letztere umfassen Schwingungsrelaxation sowie Interkombination von einem Singulett- in einen Triplettzustand. (Gargouri, 2010 S. 34) (Winaug, 2009 S. 34) Können im Falle einer auftretenden Spin-Bahn-Kopplung auch die Triplettzustände zur Lichterzeugung herangezogen werden, erhöht sich die Quantenausbeute, was sich in einer Erhöhung der Emissionsrate und somit in einer Erhöhung von k_s in der Formel niederschlägt. (Banerji, 2012 S. 27)

Viel wichtiger im Kontext der Anwendung ist jedoch die innere bzw. äußere Quanteneffizienz η_{int} bzw. η_{ext} . Während η_{int} das Verhältnis von emittierten Photonen zu den insgesamt induzierten Ladungsträgern angibt, bezeichnet η_{ext} die aus der OLED austretenden Photonen. Durch verschiedenen optische Effekte wie Brechung an den

unterschiedlichen Schichten der OLED sowie Interferenzerscheinungen des erzeugten Lichtes können die Werte für η_{int} und η_{ext} eine Differenz aufweisen, die es im Zuge der Effizienzsteigerung zu minimieren gilt. (Winaug, 2009 S. 34f)

Farbtuning und „bandgap engineering“

Aufgrund der direkten Beziehung zwischen den energetischen Abständen der angeregten Zustände zum Grundzustand kann die Wellenlänge des erzeugten Lichts und somit auch dessen Farbe durch chemische Veränderungen der Struktur gezielt beeinflusst werden. Die Farbänderung des emittierten Lichts beruht auf einer Änderung der relativen energetischen Lage zwischen angeregtem Zustand und Grundzustand. Der Spielraum für das sogenannte bandgap engineering oder Farbtuning, die POLEDs und SMOLEDs hierbei bieten, variiert gemäß der unterschiedlichen Beschaffenheit der Emittersubstanz stark. Zunächst sollen die möglichen Stellschrauben bei Polymeren zur Anpassung der Leuchtfarbe an einigen Beispielen exemplarisch betrachtet werden.

Da bei Polymeren das Ausmaß des konjugierten π -Elektronensystems, die Bandlücke⁴, maßgeblich beeinflusst, liegt es nahe, bei einer Vergrößerung dieses Systems von einer bathochromen Verschiebung des emittierten Lichtes auszugehen, da mit zunehmender Anzahl der konjugierten Doppelbindungen die Delokalisierung der Elektronen ansteigt. Diese Zunahme der Delokalisierung resultiert in einer energetischen Absenkung des LUMOs. Damit sinkt folglich auch die Energiedifferenz zum HOMO, sodass das emittierte Licht eine geringere Frequenz aufweist. Wie Abbildung 14 veranschaulicht, ist die obenbeschriebene Relation keinesfalls linear, sondern weist einen Sättigungseffekt, typischerweise bei 5- 15 Doppelbindungen, auf. Jede weitere eingeführte Doppelbindung danach hat folglich nur noch einen marginalen Einfluss.

⁴ Die Bandlücke bezeichnet die energetische Differenz zwischen HOMO und LUMO. Da sich in einem Polymer die einzelnen Molekülorbitale zu einem Band überlagern, wird hier von einer Bandlücke gesprochen.

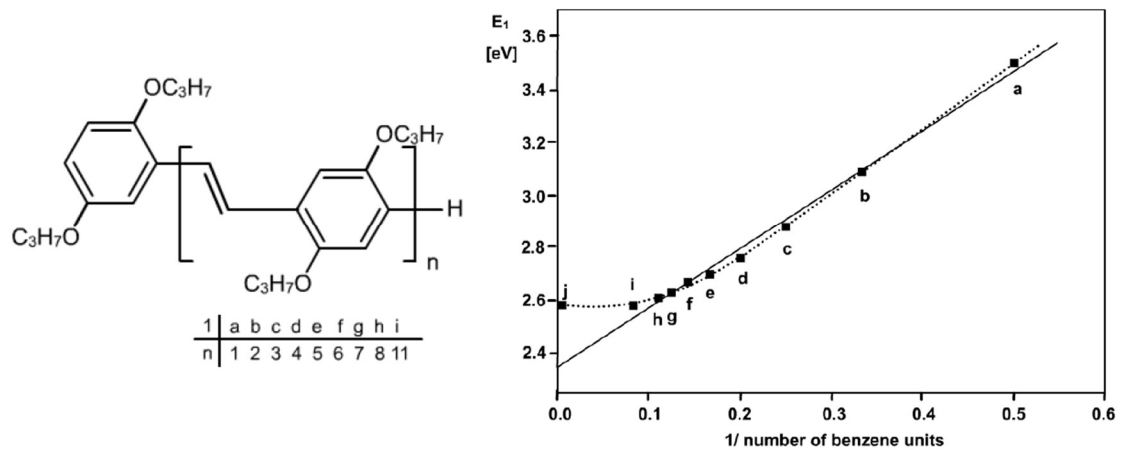


Abbildung 14: Verdeutlichung des nichtlinearen Einflusses der Länge des Systems konjugierter Doppelbindungen auf das Emissionsspektrum des Polymers

links: untersuchter Emittor: Dialkoxy substituierten Phenylenvinylens

n: Anzahl der Wiederholungseinheiten(siehe Strukturformel des Polymers)

rechts: Emissionsmaximum des Polymers in Abhängigkeit des Kehrwertes der Wiederholungseinheiten

E₁: Absorptionsmaximum

x-Achse: Reziprokes der Anzahl der Wiederholungseinheiten $\frac{1}{n}$

y-Achse: Emissionsmaximum E₁

Beim hier ausgewählten Polymer stellt sich der Sättigungseffekt bei ca. n=11 ein

(Banerji, 2012 S. 9)

Störfaktoren dieser Konjugation sind hierbei Elimination von Bindungen z.B. durch Ausbilden von Querverbindungen zu benachbarten Molekülen sowie andere Unterbrechung des zusammenhängenden Systems wie beispielsweise aus der planaren Ebene gedrehten Bereiche im Molekül. Im letzteren Fall wird durch diese Verdrehung die Überlappung der p-Atomorbitale die Weiterführung des konjugierten π -Elektronensystems in diesem Bereich verhindert, was entgegen dem obengenannten bathochromen Effekt, einer Vergrößerung der Delokalisation, eine hypsochrome Verschiebung zur Folge hat. (Banerji, 2012 S. 19)

Eine weitere Möglichkeit zur Anpassung des Emissionsspektrums stellt die Einführung von Substituenten in die Emittersubstanz dar. Deren Einfluss konzentriert sich hauptsächlich auf Löslichkeitseigenschaften und die Tendenz zur Aggregation, die Zusammenlagerung der Moleküle der Emittersubstanz. Beispielsweise verringert die Einführung von sperrigen Substituenten das Ausmaß der Aggregation, was die Wechselwirkungsmöglichkeiten der nun weniger zusammengelagerten Moleküle reduziert. Dies hat neben der Reduktion der sonst durch diese Wechselwirkung verursachte Rotverschiebung des emittierten Lichts ebenfalls eine vergleichsweise erhöhte Phosphoreszenzwahrscheinlichkeit zur Folge. Im Falle einer ausgeprägteren Aggregation würden hingegen Phosphoreszenzerscheinungen durch nicht radiativen

Konkurrenzprozesse eingeschränkt, die durch das Zusammenlagern begünstigt werden würden. So führt eine Verringerung der Aggregation zu einer hypsochromen Verschiebung. Diese Verschiebung hin zu einer höheren Frequenz des emittierten Lichtes ist auch bei sehr viel sperrigeren Substituenten zu beobachten, ist in diesem Fall jedoch eher der Unterbrechung des konjugierten Doppelbindungssystem durch Herausdrehen von Teilen des Moleküls aus der Ebene durch sterische Hinderung zuzuschreiben. Darüber hinaus wirkt sich die Einführung von Alkylresten bzw. ionischen Substituenten auf die Löslichkeit in hydrophoben bzw. hydrophilen Lösungsmitteln aus.. (Banerji, 2012 S. 17f)

Zur Farbanpassung bei SMOLEDs verfügen Forschung und Industrie hingegen über vier Ansätze.

Variation des Zentralatoms:

In den meisten Dioden wird neben Platin Iridium aufgrund seiner hohen Kernladungszahl von $Z=77$ und der daraus resultierenden ausgeprägten Spin-Bahn-Kopplung, die Phosphoreszenz und somit die Quantenausbeute fördert, mit besonderer Vorliebe eingesetzt. In den häufig verwendeten Iridium(III)-Komplexen liegt das Übergangsmetall in einer d_6 -Konfiguration vor und bildet meist mit drei zweizähligen einfach negativ geladenen Chelatliganden Komplexe mit einer oktaedrischen Geometrie aus. Die Koordination der Liganden erfolgt wie in Abbildung 15 gezeigt über eine koordinative C-Ir-Bindung sowie über eine N-Ir-Bindung. Wird einer der drei identischen frabgebenden Liganden durch einen anderen, sogenannten Sättigungsliganden ersetzt, ist aus einem ursprünglich homoleptischen Komplex mit drei identischen Liganden ein heteroleptischer Komplex entstanden. Bedingt durch eine hohe Ligandenfeldstabilisierungsenergie, die dem Übergang in die energetisch höhergelegenen Orbitale $d_{x^2-y^2}$ und d_{z^2} eine hohe Energiebarriere entgegenstellt, liegen die gebildeten Ir(III)-Komplexe vorwiegend in diamagnetischen low-spin Form vor.

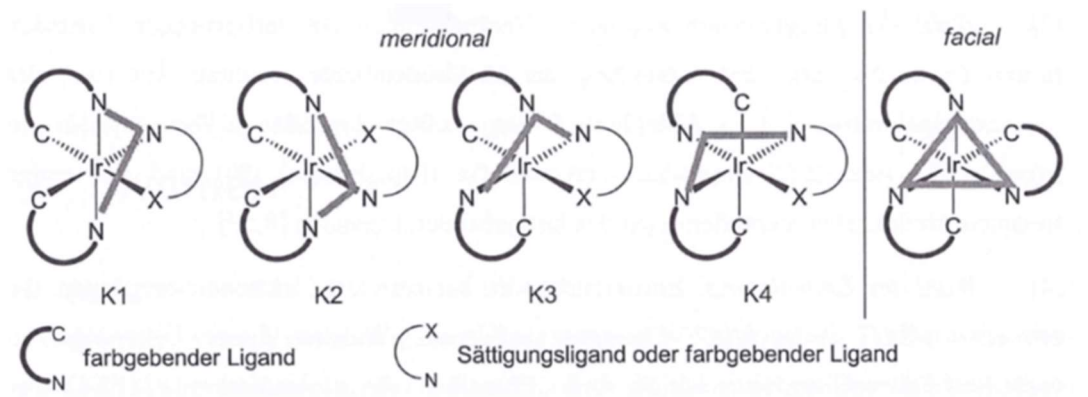


Abbildung 15: mögliche Konformationen des Iridium(III)Komplexes unterteilt in meridional (N-Ir-Bindungen entlang einer Strecke) und facial (N-Ir-Bindungen gegenüberliegend)

(Winaug, 2009 S. 43)

Einbringen von Substituenten an den farbgebenden Liganden.

Diese Methode beruht hauptsächlich auf einer stabilisierenden bzw. einer destabilisierenden Effekten zur Anpassung der relativen energetischen Lage des angeregten Zustandes und des Grundzustands. So führt beispielsweise eine Stabilisierung des HOMO bei unverändertem LUMO zu einer hypsochromen Verschiebung, da so der Grundzustand energetisch abgesenkt und damit die Energielücke zwischen HOMO und LUMO vergrößert wird. Der Einfluss der Substituenten ist dabei stark von deren Position im Liganden abhängig. (Winaug, 2009 S. 43) Dies lässt sich exemplarische am in Abbildung 15 dargestellten Komplex und dessen Substitution mit Methoxy- bzw mit Nitrilgruppen (OCH₃- bzw. CN-)veranschaulichen. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich dabei auf das faciale Konstitutionsisomer des in Abbildung 16 gezeigten Komplexes.

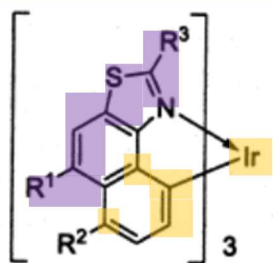


Abbildung 16: Iridium(III)Komplex mit einem verbrückten Heterofünfring.

In den folgenden Diskussionen wird die faciale Form verwendet

orange: HOMO dominierte Bereiche des Komplexes im S_0 -Zustand (vgl. Abbildung 17)

violett: LUMO dominierte Bereiche des Komplexes im S_0 -Zustand (vgl. Abbildung 17)

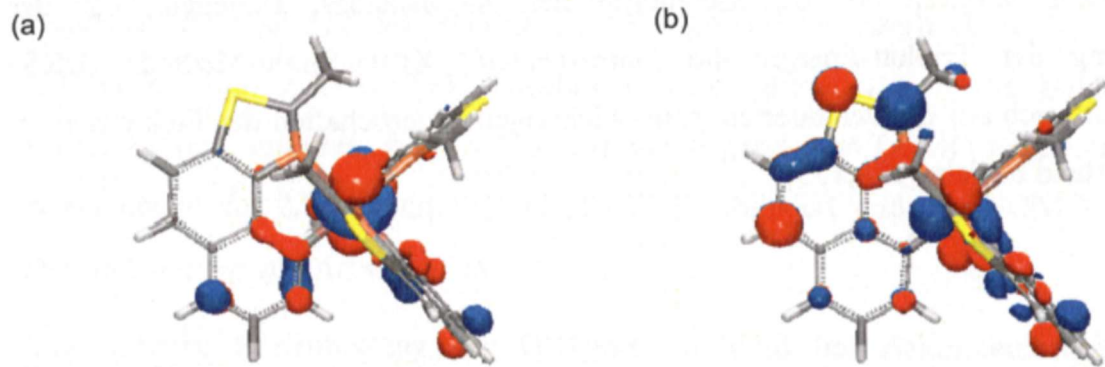


Abbildung 17: farbige Darstellung der Grenzorbitale im S_0 -Zustand des unsubstituierten Komplexes
a) HOMO: Iridium-Atom und Teile des koordinierten Phenylring, an dem sich R_2 befindet
b) LUMO; Thiazolring und Ethenoeinheit des Liganden (Winaug, 2009 S. 177)

(Winaug, 2009 S. 177)

Betrachtungen der Ausdehnungen des HOMO sowie des LUMO erlauben eine Lokalisation des HOMO bzw. LUMO wie in Abbildung 16 und 17 verdeutlicht.:

Während das HOMO vor allem auf dem zentralen Iridium-Atom sowie dem koordinierten C-Atom und die zu diesem ortho- und para-ständigen C-Atomen vorherrschend ist, ist das LUMO vornehmlich auf dem Thiazolring und der hiermit verbrückten Ethenoeinheit auf dem Liganden dominierend. (Winaug, 2009 S. 177f)

Wie Abbildung 18 verdeutlicht ist die Wirkung der eingeführten Methoxygruppe und Nitiril-Gruppen stark von deren Position abhängig.

		111	72	112	113	114
R ¹		OCH ₃	H	H	CN	H
R ²		H	H	OCH ₃	H	H
R ³		CH ₃	CH ₃	CH ₃	CH ₃	CN
S₀-Geometrie						
<i>E</i> _{HOMO}	in eV	-4.22	-4.45	-4.05	-5.15	-5.02
<i>E</i> _{LUMO}	in eV	-1.84	-2.19	-2.02	-3.19	-3.30
ΔE_{Gap}	in eV	2.38	2.26	2.03	1.96	1.72
T₁-Geometrie						
<i>E</i> _{T1}	in eV	2.33	2.28	2.10	2.07	1.97
$\lambda_{\text{max}}(\text{em})$	in nm	532	543	589	598	629

Abbildung 18: Darstellung der energetischen Anhebung oder Absenkung von HOMO und LUMO durch Einführen der Substituenten an den Positionen R¹ bis R³

$\lambda_{\text{max}}(\text{em})$: Emissionsmaximum des jeweiligen Komplexes. Die jeweiligen Komplexe 111-114 sind nach aufsteigenden Werten für $\lambda_{\text{max}}(\text{em})$ geordnet.

111 und 112: An R¹ bzw. R² werden Methoxygruppen eingeführt

113 und 114: An R¹ bzw. R³ werden Nitrilgruppen eingeführt

Bei der Einführung einer elektronenschiebende Methoxygruppe an die vom HOMO dominierte Position R¹ (siehe Verbindung 112) erfährt das HOMO im Vergleich zum unsubstituierten Komplex 72 eine energetische Anhebung von

$$\Delta E = -4.45 \text{ eV} - (-4.05 \text{ eV}) = 0.40 \text{ eV}. \quad (\text{Gl.11})$$

Das LUMO erfährt, wie analog durch Vergleich von *E*_{LUMO} von 72 und 112 abgelesen werden kann eine vergleichsweise geringere energetische Destabilisierung von $\Delta E = 0.17 \text{ eV}$. In gleicher Weise lässt sich bei Betrachtung von Verbindung 111, bei dem die Methoxy-Gruppe in einen LUMO-dominierten Bereich eingeführt wurde, eine energetische Destabilisierung des LUMO von $\Delta E = 0.35 \text{ eV}$ und vergleichsweise kleinere energetische Anhebung des HOMO von $\Delta E = 0.23 \text{ eV}$ feststellen.

Die Einführung der Nitrilgruppen an Position R¹ im Falle von 113 bzw. in Position R³ bei 114 resultiert in beiden Fällen in einer energetischen Annäherung von HOMO und LUMO. Wie aus Abbildung 18 hervorgeht ist die Stabilisierung des LUMO bei Komplex 114 mit $\Delta E = 1.11 \text{ eV}$ noch etwas größer als bei 113. Gleiches lässt sich auch über die bei beiden Verbindungen im Vergleich zur Absenkung des LUMOs geringeren

Stabilisation des HOMOs festhalten. Diese ist bei 114 mit $\Delta E = 0.57$ einerseits deutlich geringer als die Absenkung des LUMOs andererseits aber auch etwas größer als die energetische Stabilisation des HOMO bei 113.

Bei Betrachtung der in Abbildung zugeordneten Werte für das Emissionsmaximum lässt sich festhalten, dass die Einführung von Nitirilgruppen wie vorangegangen diskutiert aufgrund energetischer Stabilisierung und Destabilisierung der Grenzorbitale eine bathochrome Verschiebung zur Folge hat. Gleiches gilt zudem für die Verbindung 112. Hierbei beruht die Verringerung der energetischen Differenz von HOMO und LUMO jedoch auf der eingeführten Methoxygruppe. Bei 112 hingegen ist die Destabilisierung des LUMO so stark, dass hier eine hypsochrome Verschiebung zu beobachten ist. (Winaug, 2009 S. 177-181)

Wahl des Sättigungs- und farbgebenden Liganden sowie Wahl des Zentralatoms
Weitere Wege zur Farbanpassung der OLED sind einerseits die Wahl des Sättigungsliganden, welche jedoch nur einen geringen Einfluss hat, sowie die Wahl der farbgebenden Liganden und des Zentralatoms. Während durch Variation der farbgebenden Liganden das Emissionsspektrum durch eine Alternation der Elektronendichte optimiert werden kann, ist bezüglich des Einflusses des Zentralatoms vordergründig das durch die Kernladungszahl bestimmte Ausmaß der Spin-Bahn-Kopplung und die individuelle Ligandenfeldstabilisierungsenergie ausschlaggebend. (Winaug, 2009 S. 177-183)

Lebensdauer und Lösungsansätze für Degradationsprobleme

Die zu beobachtenden Degradationsmechanismen lassen sich grob in strukturelle und intrinsische Prozesse unterteilen.

Ein Beispiel für strukturelle Veränderungen ist beispielsweise die Entstehung nicht leuchtender Stellen im Polymer, sogenannter dark spots. (Schildknecht, 2006 S. 150f) Hauptursachen hierfür sind einerseits das Ablösen der Kathode (Delaminierung) oder deren Oxidation, bei der eine elektrisch isolierende Oxidschicht auf der Kathodenoberfläche gebildet wird. In beiden Fällen wird auf Kosten der Effizienz der OLED die Elektroneninjektion in die angrenzende Polymerschicht unterbunden. Elektrolytische Zersetzung von eindringendem Wasser unterstützt hierbei ersteren

Prozess, die Delaminierung der Kathode, da vor allem die so gebildeten Wasserstoffgasblasen die Ablösung zusätzlich begünstigen. Hierbei kann eine Verbesserung der Verkapselung der OLED durch Verkleben der Bauteile in einer chemisch inerten Umgebung Abhilfe schaffen. Die durch diese Verkapselung und die Verwendung von Glas als Trägersubstrat erhöhte Steifheit der OLED setzt jedoch den Visionen von aufrollbaren Displays gegenwärtig noch klare Grenzen.

Ein weitere Faktor, der zur Ausbildung von dark spots und somit zur Degradation beiträgt, sind Kurzschlüsse zwischen den beiden Elektroden. Dies kann beispielsweise durch die Migration metallischer Bestandteile der Elektroden oder durch metallische Verunreinigungen, die nach der Synthese nicht aus dem Produkt entfernt worden sind, verursacht werden. In beiden Fällen bildet sich eine direkte, elektrisch leitende Verbindung zwischen Kathode und Anode aus, was einem Kurzschluss gleich kommt. Insgesamt ruft zudem jegliche Ansammlung oder Verlagerung von geladenen Spezies ein elektrisches Feld hervor, welches dem von außen zwischen den Elektroden angelegtem Feld entgegenwirken kann. Somit wird die für eine gleichbleibende Leuchtleistung erforderliche Spannung erhöht.

Unter den intrinsischen Degradationsprozessen lässt sich z.B. der Zerfall der Emittersubstanzen anführen. Ein wichtiger Treibfaktor ist hierbei die Photooxidation, die besonders durch die hohe Anzahl vorhandener angeregter Zustände begünstigt wird. Hierbei können die angeregten Triplettzustände eindringenden Luftsauerstoff in den Singulett-Zustand anheben ($^1\text{O}_2$). Der so angeregte Sauerstoff greift nun das System konjugierter Doppelbindungen der organischen Moleküle an und spaltet diese in zwei Substanzen mit jeweils einer endständigen Carbonylgruppe. Die so herbeigeführte Verkürzung des konjugierten π Elektronensystems hat einerseits eine Verminderung der Ladungsträgerleitfähigkeit zur Folge, was sich in einem höheren Stromverbrauch bei konstant bleibender Leistung niederschlägt. Andererseits fördern die durch die Spaltung des Polymers entstandenen endständigen Carbonylgruppen eine strahlungslose Vernichtung von Singulettzuständen. (Schildknecht, 2006 S. 150f) (Banerji, 2012 S. 30)

Abschließende Beurteilung und Abgleich mit Herkömmlichen Leuchtmitteln

Vorteile gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln:

Den oben beschriebenen Problemen und enormen Kosten, die bei der Produktion und Entwicklung organischer Leuchtdioden anfallen, lassen sich eine Vielzahl von Vorteilen herkömmlichen Leuchtmitteln entgegenstellen. Diese reichen von den bereits einleitend erwähnten vergleichsweise hohen Kontrastschärfe und Effizienz durch fehlende Hintergrundbeleuchtung über einen großen Betrachtungswinkel von über 160° und eine verringerte Reaktionszeit bis hin zu einer einfacheren Realisierung großer Leuchtflächen. Besonders in letztem Punkt, sind die OLEDs den punktförmigen Leuchtmitteln wie LEDs durch den möglichen flächigen Auftrag der Emittersubstanz deutlich überlegen, da hierbei punktförmige Lichtquellen wie die LED den Nachteil von Schatten zwischen den einzelnen Lichtpunkten aufweisen. (htt) (Bächle, 2013) „Außerdem lassen sich die Leuchtfarben der Materialien [wie bereits in vorangegangenen exemplarisch dargestellt] einfach auf die Bedürfnisse von Kunden anpassen,“ (Bächle, 2013) Zudem scheint auch das Problem der großen Rigidität durch Verkapselung und Glassubstrat kurz vor einer Lösung zu stehen, wie eine Pressemitteilung des Fraunhofer-Institutes im Jahre 2017 hoffen lässt. „OLED auf Metall- oder Kunststofffolien sind ebenso prozessierbar wie auf Dünnstglas“ heißt es in der entsprechenden Pressemitteilung. (Fraunhoferinstitut, 2017) Auch für das gegenwärtig größte Problem, die kostengünstige Fertigung der OLED in Serienreife und großer Stückzahl, wurden bereits vielversprechende Ansätze vorgeschlagen und auch Vertreter in Industrie und Wirtschaft geben sich größtenteils optimistisch. So geht der Vice-President eines der marktführenden Unternehmen *Merck KGaA* davon aus, dass in „2, 3 Jahren marktreife Produkte auf Basis der OLED-Tinten erhältlich sein [werden]“ (Schenk, 2016). Schlüssel zum Erfolg scheint hierbei die Entwicklung eines Druckverfahrens zur Auftragung der verschiedenen Schichten der OLED. Im Fall eines solchen Druckverfahrens ließen sich die Produktionskosten durch einer Reduktion der Herstellungsschritte deutlich nach unten verschieben.

In Bezug auf ein weiteres Manko, der Einsatz von seltenen Elementen wie beispielsweise Iridium im Falle der SMOLEDs, lassen verschiedene Publikationen von diversen universitären Forschungsgruppen aufhorchen und auf baldige Alternativen hoffen, die ganz ohne diese begrenzten Ressourcen auskommen. (Bonn, 2013)

Fazit

Abschließend lässt sich festhalten, dass angesichts der zahlreichen und zukunftsweisenden Vorteile wie beispielsweise Energie und CO₂ Einsparung (Apel, 2013) und höherer Darstellungsqualität die Ablösung der LED durch die OLED nur noch eine Frage der Zeit zu sein scheint. Das Potential, den Kostenaufwand deutlich unter das Niveau der LED zurück zu treiben, ist zumindest laut Expertenmeinungen zweifellos gegeben. (Birnstock, 2003 S. 3) Dies hängt wie oben ausgeführt vor allem an einer Reduktion der Produktionskosten durch die Entwicklung eines Druckverfahrens. Folglich scheint die Vollendung dieses Schrittes auch den weiteren unaufhaltsamen Vormarsch der OLED-Technologie in der Elektronik und Leuchtmittelindustrie zu manifestieren.

Praktischer Teil: Versuch des Nachbaus einer vereinfachten OLED

Grundidee des Aufbaus

Um nun den Aufbau einer OLED auch praktisch nachzuvollziehen, sollte auf der Grundlage öffentlich im Internet zugänglicher Literatur, (Banerji, 2012 S. 60-69) und (Banerji S. 1-3), eine OLED mit einem vereinfachten Aufbau selbst nachgebaut werden.

Die geplanten Versuchsschritte gestalteten sich grob wie folgt:

Im Grunde genommen sollte die OLED aus zwei Hälften bestehen, die zunächst einzeln gebaut und dann im letzten Schritt wie bei einem Sandwich durch Aufeinanderlegen zusammengefügt wurden.

Die erste Hälfte bestand aus einem mit ITO (Indium-Zinn-Oxid) beschichteten und dadurch auf der entsprechenden Seite elektrisch leitenden Glassubstrat, auf das der Emitterfarbstoff, in diesem Falle Super-Yellow⁵, mittels Spincoating⁶ oder Rakeln⁷ aufgetragen wurde. Bei der Beschichtung mit dem Farbstoff sollte durch Abkleben eines Randes die Kontaktstelle auf dem leitenden Glassubstrat für das spätere Anschließen an eine Spannungsquelle zum Funktionstest frei gehalten werden.

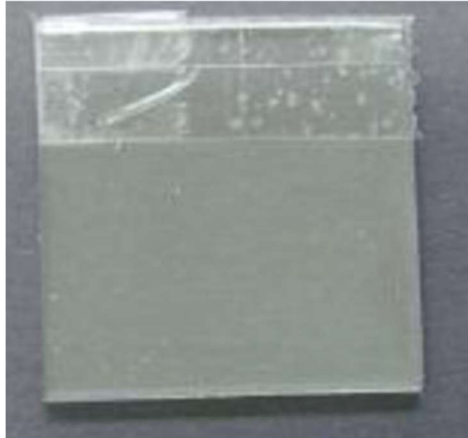


Abbildung 19: Glassubstrat vor dem Beschichten mit Farbstoff. Der Klebestreifen musste nach dem Beschichten natürlich wieder entfernt werden, um an dieser Stelle einen elektrisch leitenden Kontakt zwischen ITO-Glas und später angebrachten Kupferstreifen zu ermöglichen.

(Banerji, 2012 S. 62)

⁵ SuperYellow[®] ist eine Bezeichnung für ein häufig in OLEDs verwendetes Copolymer. Die genaue Strukturformel ist (Banerji, 2012 S. 82) zu entnehmen.

⁶ Bei einem Spincoater handelt es sich um einen in horizontaler Ebene um die eigene Achse rotierenden Drehteller. Bei ausreichend hoher Rotationsgeschwindigkeit kann dieser zum Verteilen des vorher mittig aufgetragenen Farbstoffes verwendet werden. (Banerji, 2012 S. 68)

⁷ Rakeln bezeichnet eine Alternative Möglichkeit zum gleichmäßigen Auftrag des Emitterfarbstoffes auf das Glassubstrat. Hierbei wird der Farbstoff am oberen Rand des Glases aufgetragen und beispielsweise mithilfe eines anderen Glasplättchens an dem Glassubstrat herunter gezogen und so flächig verteilt. (Banerji, 2012 S. 63)

Die zweite Hälfte bestand aus einem unbeschichteten, elektrisch nicht leitenden Glasplättchen, auf dem mittig drei selbstklebende Kupferstreifen angebracht waren. Am Ende jedes Streifens befand sich jeweils ein stecknadelkopfgroßer Tropfen Galinstan, der später als Kathode dienen sollte. Gummistreifen seitlich, längs der Kupferstreifen, welche durch das Herausragen über den Rand des Glasplättchens später beim Funktionstest als Kontaktierungsmöglichkeit für den Minuspol der Stromquelle gedacht waren, fungierten als Abstandshalter zwischen den beiden Gläsern. Beim Aufeinanderlegen der beiden Hälften am Schluss sollte die mit dem Farbstoff beschichtete Seite mit dem Galinstan auf der zweiten Hälfte in Kontakt treten, s. Abbildung 20. (Banerji S. 1-3)

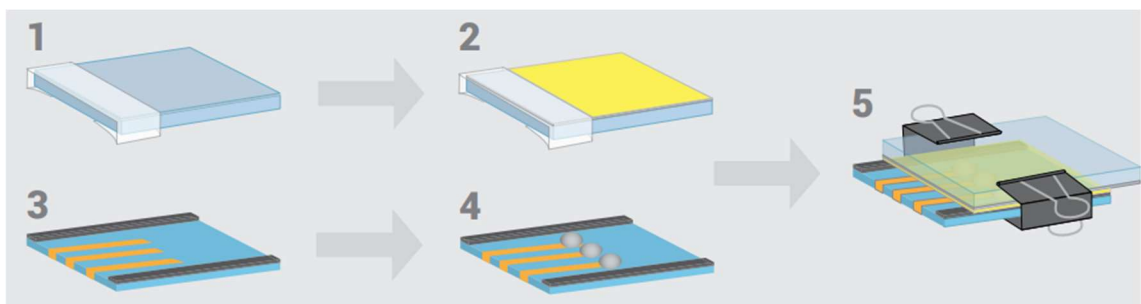


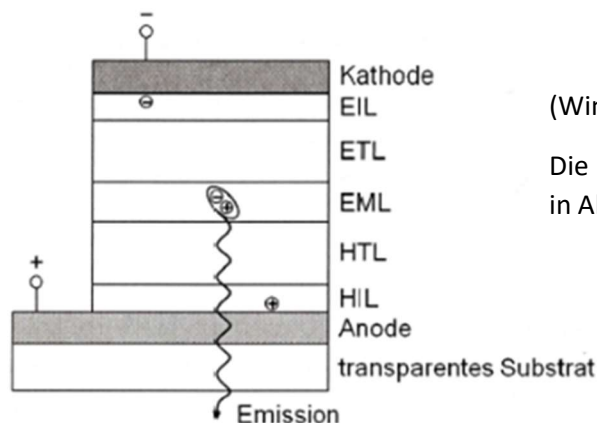
Abbildung 20: Grundidee der Konstruktion

(1 und 2): Schrittweiser Zusammenbau der oberen Hälfte der OLED

(3 und 4): Zusammenbau der anderen Hälfte durch Aufbringen der Kupferkontakte, Gummistreifen und der Galinstantropfen

(5): Aufeinanderlegen und Fixieren der beiden Hälften zur fertigen OLED.

(Banerji S. 1)



(Winaug, 2009 S. 36)

Die Funktion der einzelnen Schichten ist in Abbildung 6 näher beschreiben.

Abbildung 21: Zuordnung der Bauelemente des Eigenbaus zur jeweiligen Entsprechung in der kommerziellen OLED
Kathode: Galinstan mit Kupferstreifen als Kontaktierungsmöglichkeit, da die Galinstantropfen in der fertigen OLED für den Anschluss einer Spannungsquelle unzugänglich sind.

EIL, ETL, HIL: Mangels materielle Verfügbarkeit konnten diese Schichten nicht integriert werden.

EML: Auf des ITO-Glas aufgetragenen SuperYellow®

HTL: Diese konnte wie später weiter ausgeführt durch Unterstützung des Lehrstuhls für Werkstoffwissenschaften der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg unterhalb der SuperYellow®-Schicht aufgetragen werden. Hierbei wurde PEDOT:PPS⁸ verwendet.

Anode: ITO-Beschichtung des Glassubstrates (elektrisch leitende Beschichtung)

Transparentes Substrat: Glassubstrat selbst

⁸ (poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate) (Ossila, 2018)

Eine ausführliche Darstellung aller Bauschritte inklusive der benötigten Materialien und Chemikalien ist in der Bauanleitung der Arbeitsgruppe Didaktik der Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal (Banerji S. 1-3) nachzulesen. Ein leicht abgewandelter Aufbau, bei dem die Gummistreifen durch mehrere Lagen doppelseitigen Klebebandes mit eingelochten Aussparungen für das Galinstan ersetzt wurden, wurde ebenfalls erprobt. Eine genauere Beschreibung ist in (Banerji, 2012 S. 66) nachzulesen.

Probleme der praktischen Umsetzung

Bei der praktischen Umsetzung der oben beschriebenen Arbeitsschritte ergaben sich folgende Hauptprobleme.

- 1. Realisierung der Beschichtung durch Spincoating oder Rakeln**
- 2. Schwierige Dosierung und Handhabung des Galinstans**

Realisierung der Beschichtung durch Spincoating

Da anfangs kein professioneller Spincoater zur Verfügung stand, wurde auf der Grundlage einer entsprechenden Beschreibung (Banerji, 2012 S. 68) der Versuch unternommen, eine Spincoater mithilfe einer Handbohrmaschine und einem selbst zusammengeklebten Holzdrehteller nachzustellen

Das erste Hindernis stellte dabei die Höhe der für das Spincoating benötigten Drehzahl des Drehtellers dar. Diese betrug 2500 - 3000 Umdrehungen pro Minute und war damit deutlich höher als die der zur Verfügung stehenden Handbohrmaschinen. (Banerji, 2012 S. 68)

Hier leistete jedoch ein entsprechend leistungsfähiger Elektromotor schnell Abhilfe. Auf diesem ließ sich auch der zuvor hergestellte Holzteller ankleben.

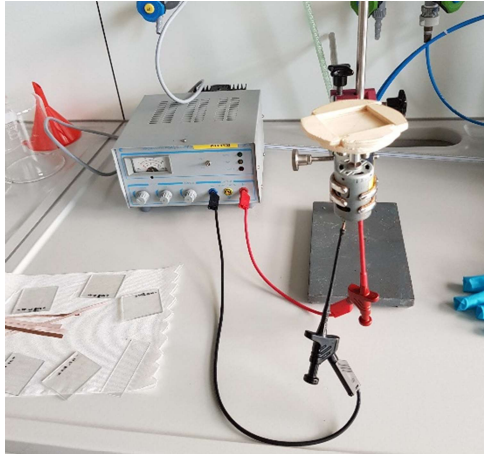


Abbildung 22: Frontalansicht der Apparatur. Der Elektromotor ist durch Stativ und Stativklemme in einer aufrechten Position fixiert. Obenauf ist der Drehteller angebracht. Die Verbindung zur Stromquelle wurde durch Klemmkontakte hergestellt. Am linken Bildrand sind vorbereitete ITO-Gläser zu sehen.



Abbildung 23: Draufsicht des Holztellers. Dieser weist eine mittige Vertiefung von etwa der Größe des zu beschichtenden ITO-Glases auf. Die seitlichen Erhöhungen sollen das Verrutschen des Glassubstrates während des Beschichtungsvorgangs durch Fliehkräfte unterbinden.

Auch diese Apparatur brachte noch einige Schwierigkeiten mit sich. Beispielsweise wurde die Halterung bei Drehzahlen um ca. 3000 Umdrehungen pro Minute mechanisch so instabil, dass selbst ein Bleiblock zur Fixierung des Stativfußes nicht mehr ausreichte.

Glücklicherweise ergab sich jedoch bald darauf die Möglichkeit, den professionellen Spincoater des Lehrstuhls für Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg für die Beschichtung der ebenfalls dort zur Verfügung gestellten ITO-Gläser zu verwenden. Hierbei war es sogar möglich, zusätzlich unterhalb des SuperYellow® PEDOT:PPS als Loch-Transportschicht mittels Spincoating aufzutragen.

Da jedoch, wie schnell klar wurde, die Handhabung eines Spincoaters etwas Übung erforderte, waren einige Versuche notwendig, um letztendlich eine entsprechend homogene Beschichtung zu erhalten. Da der Spincoater in einem Reinraum stand und dort das Fotografieren aus Gründen der Sauberkeit nicht möglich war, muss an diesem Punkt leider auf entsprechendes Bildmaterial verzichtet werden.

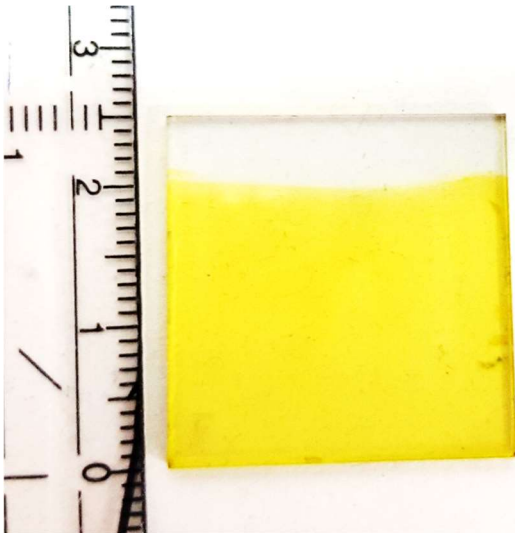


Abbildung 25: Mittels Spincoating beschichtetes ITO-Glas.

Die auf dem Bild zu erkennenden Unreinheiten sind Flecken auf der nicht beschichteten Seite des Glases und nicht in der Beschichtung selbst eingeschlossen.



Abbildung 24: Unbeschichtetes Glassubstrat

Das eingeritzte „F“ für „front“ markiert die mit ITO beschichtete Seite des Plättchens. Die Linien auf dem Glassubstrat sind der eigentlichen Verwendung der Glasplättchen im Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften für den Bau von Solarzellen auf Polymer-Basis geschuldet, stellten aber für den Bau der OLED kein Hindernis dar.

Als ähnlich übungintensiv stellte sich die Beschichtungsmethode des Rakelns heraus. Hierbei schien vor allem der Farbstoff mehr an dem eigentlich zum Verteilen gedachten Objektträger zu haften als auf dem zu beschichtenden ITO-Glas. Es bildeten sich vermehrt Streifen. Darüber hinaus verflüchtigte sich das Lösungsmittel, Toluol, vergleichsweise schnell, wodurch der Farbstoff eintrocknete und ein homogener Auftrag zunehmend erschwert wurde. Da sich der zur Verfügung stehende Spincoater nach einigen Versuchen schnell als aussichtsreichere Alternative zum Rakeln herausstellte, wurde die Methode des Rakelns zum Auftrag des SuperYellow® nicht weiter verfolgt.

Schwierige Dosierung und Handhabung des Galinstans

Neben der Problematik der Beschichtung stellt zudem der Umgang mit dem flüssigen Galinstan eine größere Herausforderung dar, als anfangs erwartet. Durch die scheinbar sehr großen Kohäsionskräfte in der Legierung ließen sich mit einer 1-ml. Einwegspritze mit aufgesetzter Kanüle meist nur zu große Mengen der Legierung auftragen. Aufgrund dieses Galinstanüberschusses und durch die Eigenschaft der Legierung, sich bei Anwendung eines mechanischen Druckes wie beim Zusammendrücken der Glasplatten sehr fein zu verteilen, ergab der erste Versuch leider nur ein sehr unsauberes Resultat.

Auch der danach unternommene Versuch, mit einem leicht modifiziertem Aufbau das großflächige Verteilen des Galinstans zu unterbinden, war nicht zufriedenstellend.

Bei diesem zweiten Versuch sollten zunächst mindestens drei Lagen doppelseitigen Klebebandes mit einander verklebt werden, bevor mit einem handelsüblichen Locher drei Löcher eingestanzte wurden. Die Kupferstreifen, die nachher mit dem Galinstan in Kontakt stehen sollten, mussten so platziert werden, dass sie einige Millimeter in die eingestanzten Löcher hineinragten. Nun musste das zuvor mit SuperYellow® beschichtete Glassubstrat mit der beschichteten Seite auf die Kupferstreifen gelegt und dort durch Andrücken des doppelseitigen Klebebandes befestigt werden. Nach dem Wenden des Aufbaus musste eine lochfreie Schicht doppelseitigen Klebebandes angebracht werden, um die OLED nach oben abzuschließen. Die Injektion des Galinstan erfolgte dann von der Rückseite durch die abschließende Klebebandschicht in den Hohlraum zwischen Kupferstreifen und dem mit SuperYellow® beschichteten Glassubstrat. Hierzu musste die oberste Schicht Klebeband mit der Kanüle einer Einwegspritze durchstoßen werden. (Banerji, 2012 S. 66)

Bei der praktischen Erprobung dieses Ansatzes, s. Abbildung 28-29, wurde jedoch schnell klar, dass der Hohlraum schlichtweg zu klein war, sodass das Galinstan herausquoll und sich dann in erster Linie auf der obersten Klebebandschicht befand. Da so nur ein geringer Teil der Legierung in elektrisch leitendem Kontakt zu den Kupferstreifen stand und die Beschichtung des ITO-Glases zudem durch das Rakeln sehr fleckig war, konnte beim späteren Funktionstest keine Lichtemission beobachtet werden. Diese bleibt auch bei dem zuvor erwähnten ersten Versuch aus, s. Abbildung 26-27. In diesem Fall ist dies jedoch eher dem ungewollten Verteilen des Galinstans geschuldet, sodass es vermutlich zu einem direkten Kontakt von Kathode, über das Galinstan zur Anode, d.h. der mit Super-Yellow® unbeschichtete Teil des ITO-Glases, kam, was einem Kurzschluss gleichkommt.



Abbildung 26: Erster Versuch
Wie oben bereits erläutert kam es durch die unerwartet schwierig Dosierung des Galinstans zu einem Kurzschluss. Die betreffende Stelle ist rot markiert.



Abbildung 27: Einzelteile des ersten Aufbaus
links: Galinstan
rechts im Glasfläschchen: SuperYellow®
mittig: Fertig zusammengebauter erster Versuch
außerdem: Selbstklebende Kupferstreifen, noch unbeschichtetes ITO-Glas und mit doppelseitigem Klebeband versehenes Glasplättchen, auf dem der Kupferkontakt aufgebracht werden sollte.

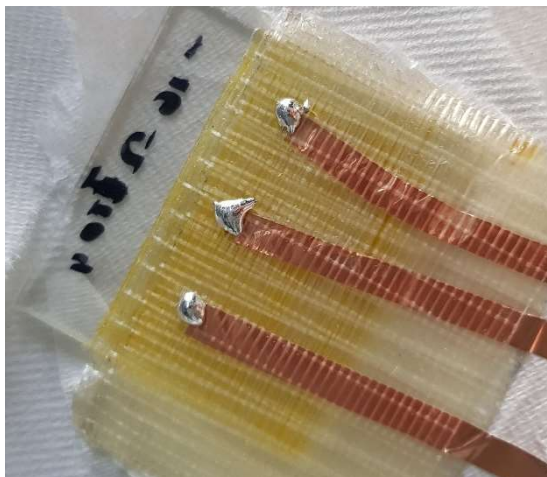


Abbildung 28: Herausquellen des Galinstans.
Anstatt wie geplant unterhalb der obersten Schicht doppelseitigen Klebebandes zu bleiben, tritt die Legierung aus.

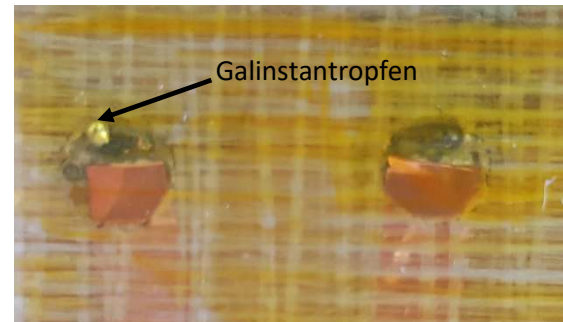


Abbildung 29: Nahaufnahme der fehlenden Kontakte von den Kupferstreifen zum Galinstan.
Die faserige Struktur ist der Beschaffenheit des doppelseitigen Klebebandes zuzuschreiben, nicht dem Glas oder anderen Bauteilen. Wie am linken Loch zu erkennen ist, besteht kein Kontakt zwischen Kupfer und Galinstan.

Aus diesem oben angeführten Gründen glich die Strom-Spannungskennlinie⁹ des ersten Aufbaus, s. Abbildung 26-27, der eines ohmschen Widerstandes, da der gemessene Strom linear mit der angelegten Spannung anstieg. Wäre der Strom hingegen über einem bestimmten Schwellwert der angelegten Spannung sprunghaft angestiegen, wäre dies ein

⁹ Die Strom-Spannungskennlinie, auch U-I-kennlinie genannt, gibt die Höhe des Stromflusses durch ein elektrisches Bauteil in Abhängigkeit der sukzessiv erhöhten angelegten Spannung wieder. Im Regelfall ist die Spannung, U, auf der x-Achse, der fließende Strom, I, auf der y-Achse abgetragen. (Barnert, 1998)

Hinweis auf ein Diodenverhalten gewesen und es hätte bei Verdunklung nach leuchtenden Bereichen gesucht werden können (Spe18)

Die U-I-Kennlinie des zweiten Aufbaus (Abbildung 28-29) zeigte keinen nennenswerten Stromfluss an. Die Durchgangsprüfung fiel negativ aus, sodass wie oben bereits vermutet kein elektrisch leitender Kontakt zwischen Kathode, Anode und dem Emitterfarbstoff bestand.

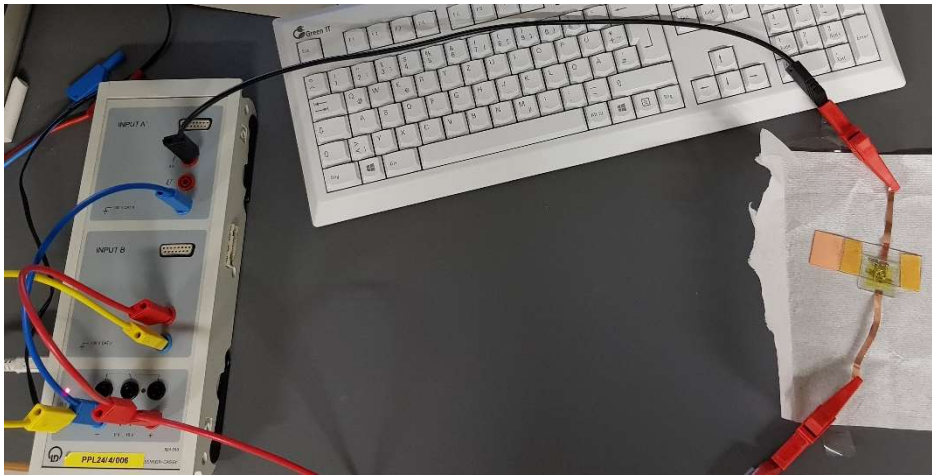


Abbildung 31: Messaufbau zum Aufnehmen der U-I-Kennlinien.

Verbesserung der Konstruktion zur Kontrolle der Galinstanverteilung

Nach den ernüchternden Ergebnissen der ersten beiden Versuche, sollte nun im dritten und vierten Anlauf die Hauptschwierigkeit, das Herstellen eines elektrisch leitenden Kontaktes vom Galinstan zum Kuper und zum Emitterfarbstoff, ins Auge gefasst werden, ohne dabei durch eine direkten Kontakt der Elektroden eine Kurzschluss zu provozieren,.

Hierzu sollte der Galinstantropfen rund herum mit Schaumstoff bzw. mit Gummi aus einem Fahrradschlauch eingefasst werden, um eine ungewollte Verteilung der Legierung beim Zusammendrücken der beiden Hälften zu verhindern.

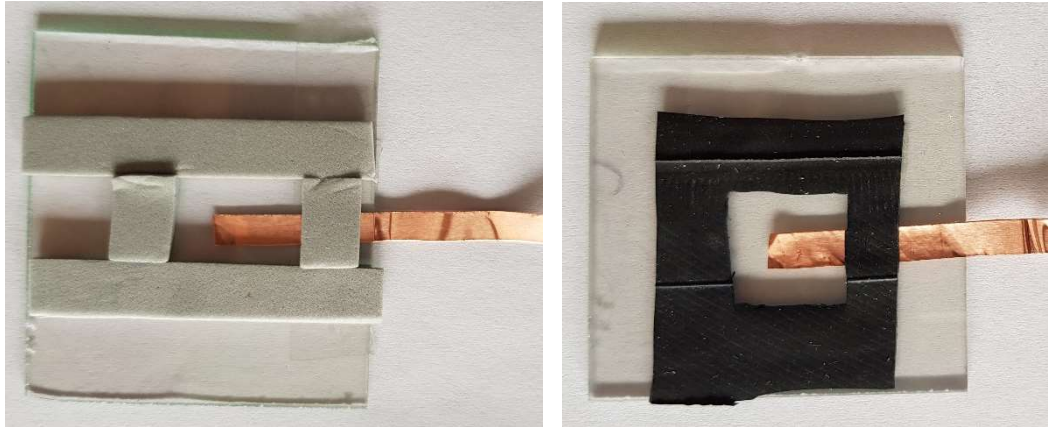


Abbildung 32: Verbesserter Aufbau mit Schaumstoff (links) bzw. Gummi (rechts), um die Verteilung des Galinstans besser zu kontrollieren und so Kurzschlüsse auszuschließen

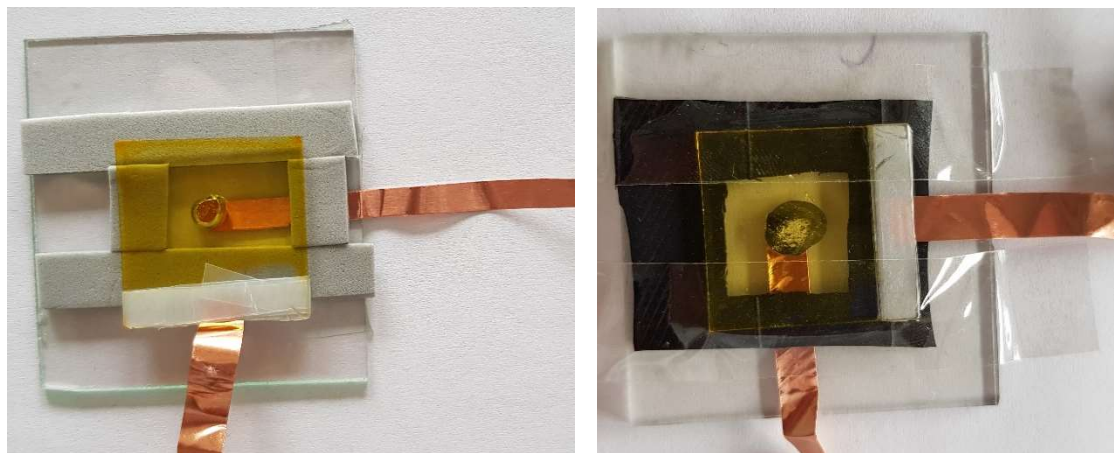


Abbildung 33: Fertig zusammengebaute OLEDs mit Schaumstoff (links) und Fahrradschlauchgummi (rechts)

Beim Funktionstest ließ sich jedoch auch bei Spannungen von über 9V, was dem Wert der in der Literatur angegebene benötigte Spannung entspricht, kein nennenswerter Stromfluss messen. (Banerji S. 2)

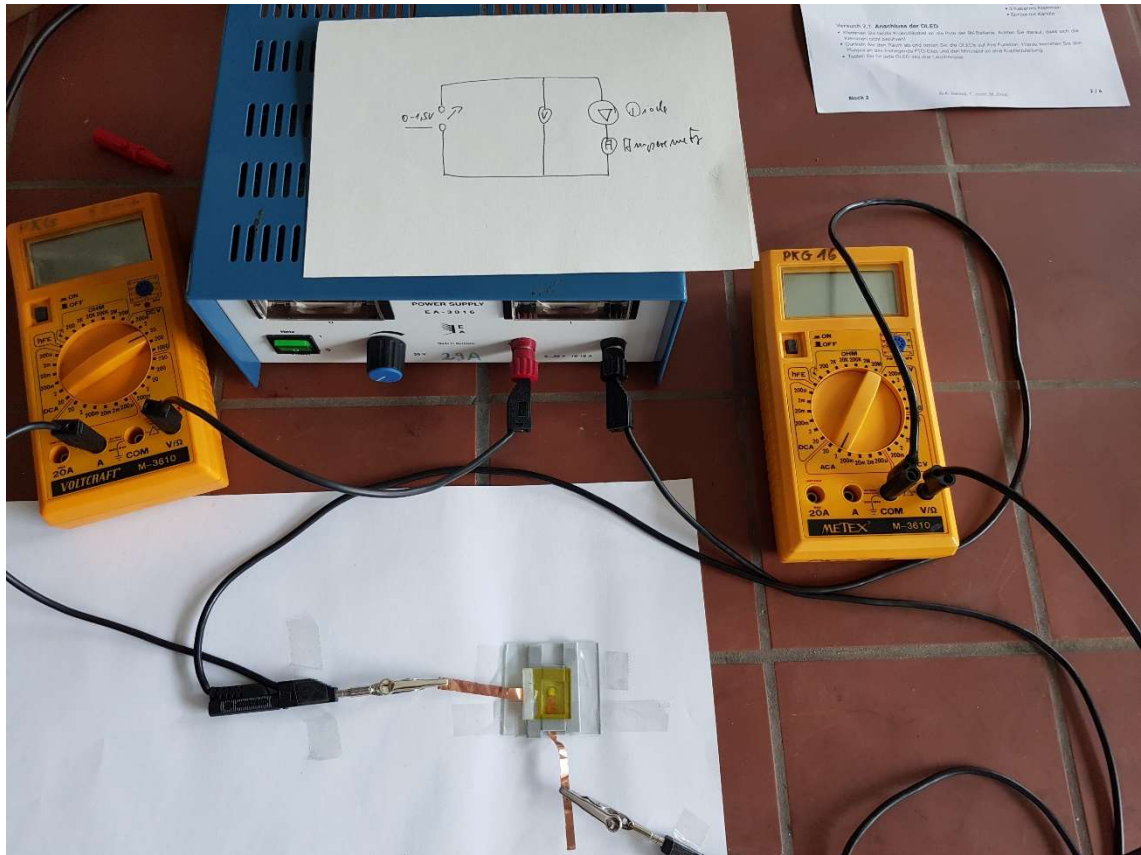


Abbildung 34: Versuchsaufbau für den Funktionstest beider Aufbauten. Wie der Schaltkizze im oberen Teil des Bildes zu entnehmen ist, wurden hier Spannungs- und Stromwerte mittels parallel bzw. in Reihe geschalteter Multimeter gemessen. Die angelegte Spannung wurde manuell langsam von 0 auf 9 V erhöht und die Anzeigen der Multimeter überwacht.

Auch die Durchgangsprüfungen für beide Aufbauten fiel, trotz klar erkennbarem Kontakt von Kupfer zu Galinstan und vom Galinstan zum SuperYellow®, nicht aber zum unbeschichteten Teil des ITO-Glases, negativ aus. Nach erneutem Zerlegen der nicht funktionstüchtigen OLEDs ergaben getrennte Durchgangsprüfungen, dass Galinstan und Kupfer leitend verbunden waren. Hingegen entpuppte sich der Klebefilm des selbstklebenden Kupferstreifens als elektrischer Isolator und war somit wahrscheinlich für die Funktionsuntüchtigkeit des Aufbaus verantwortlich.

Im Folgenden wurden die Kupferstreifen umgedreht, sodass nun die nicht klebende Seite der Kupferstreifen auf dem ITO-Glas zu liegen kam, und eine erneute Durchgangsprüfung durchgeführt. Da diese Messung für die gesamten OLEDs keinen Stromfluss anzeigte, musste erneut der Durchgang der einzelnen Verbindungsstellen zwischen den Bauteilen separat überprüft werden. Hierbei fiel die Durchgangsprüfung sowohl für den Kontakt von Galinstan zum entsprechenden Kupferstreifen, als auch vom ITO-Glas zum daran befestigten Kupferstreifen positiv aus.

Mögliche Ursachen für das Ausbleiben der Lichtemission

Da die übrigen Verbindungsstellen zwischen den Einzelteilen der OLED wie oben beschrieben zumindest elektrisch leitend verbunden waren, liegt die Vermutung nahe, dass der elektrisch leitende Kontakt entweder an der Verbindungsstelle von Galinstan zum SuperYellow® oder an der Verbindung vom SuperYellow® zur ITO-Beschichtung des Glassubstrates unterbrochen wird. An welcher der beiden obengenannten Stellen die elektrisch leitende Verbindung abbricht war leider mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten nicht genauer zu ermitteln.

Ein möglicher Grund für das Abbrechen des Kontaktes zwischen Galinstan und SuperYellow® ist die Ungewissheit über die Zusammensetzung der beiden Chemikalien. Beispielsweise waren den im Vorangegangenen angeführten Quellen nicht zu entnehmen in welchem Verhältnis die drei Bestandteile der Legierung, Indium, Gallium und Zinn, in dem von den Autoren verwendeten Galinstan vorlagen. Unter dem in (Banerji, 2012 S. 61) angegebene Link zur Herstellerfirma des Galinstans war das Produkt nicht oder nicht mehr zu finden. Auch ließen die Herstellerinformationen zu der in dieser Arbeit verwendeten Legierung keinerlei Rückschlüsse auf das Mengenverhältnis der Metalle zu. (metallpulver24, 2018)

Des Weiteren stellt auch die Unkenntnis der Konzentration des Emitterfarbstoffes einen möglichen Erklärungsansatz für die Funktionsunfähigkeit der selbstgebauten OLEDs dar. Aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Menge und mangels der entsprechenden Messgeräte konnte die Konzentration nicht anhand optischer Eigenschaften des Polymers unter Ausnutzung des LAMBERT-BEER'schen Gesetzes bestimmt werden. (Ruhr-Universität Bochum S. 73-77)

Hinzu kommt, dass die ITO-Beschichtung des verwendeten Glassubstrates nur eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit aufwies. Ein Stromfluss ließ sich nur messen, wenn beide Kontakte des Durchgangsprüfers lediglich wenige Millimeter voneinander entfernt auf dem beschichteten Glas platziert wurden. Ebenso könnte die möglicherweise zu dünne Beschichtung des ITO-Glases mit SuperYellow® ein Grund für die Fehlfunktion sein.

Da durch sukzessive Verbesserung und Verfeinerung der Konstruktion der OLED anfängliche Defekte wie das unkontrollierte Ausbreiten des Galinstans oder der isolierende Effekt des Klebefilms des Kupferstreifens ausgemerzt werden konnten, sind

die obengenannten fehlenden Informationen bezüglich des Galinstan und des SuperYellow® bzw. der Schichtdicke ihres Auftrages vermutlich als die Ursachen der Funktionsunfähigkeit der OLED anzusehen.

Abschließende Beurteilung des praktischen Teils

Obwohl bei sämtlichen Versuchsaufbauten eine Lichtemission ausblieb, bot die praktische Herangehensweise wertvolle Einblicke in die technischen Herausforderungen bei der industriellen Produktion von OLEDs.

Beispielsweise wurde so die Schwierigkeit der Beschaffung der Materialien und Chemikalien, besonders des SuperYellow®, aus erster Hand erfahrbar. Trotz der beträchtlich größeren Dicke der selbstgebauten OLEDs im Vergleich zu der industriell gefertigten Vorbilder, war der hohe Präzisionsanspruch an Maschinen und Fertigungsschritte des Herstellungsprozesses klar zu erkennen.

Bei nächsten Versuchen sollten angesichts der festgestellten Probleme folgende Eigenschaften variiert werden:

3. *Dicke der ITO-Beschichtung des Glassubstrates*
4. *Dicke der SuperYellow®-Schicht*
5. *Konzentration des SuperYellow®*
6. *ggf. Zusammensetzung des Galinstans*

Rückblickend hielt trotz fehlender Lichtemission der OLED deren Nachbau im praktischen Teil wertvolle Einblicke und einen spannenden Perspektivwechsel bereit.

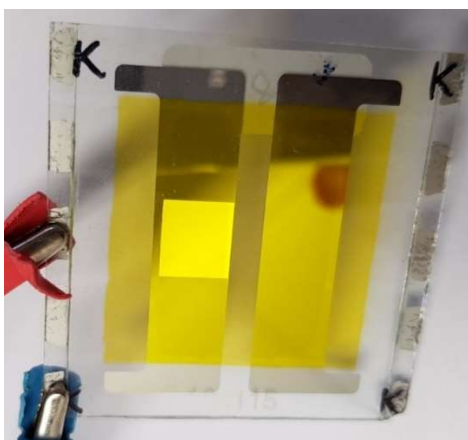


Abbildung 35: Zum Vergleich: industriell gefertigte OLED der Firma Merck KGaA

Literaturverzeichnis

Aggarwall A. Vikas [et al.] Fluctuating exciton localization in giant (π)-conjugated spoked-wheel macrocycles [Artikel] // nature chemistry. - Keuklé- Institut für Organische Chemie und Biochemie der Universität Bonn, Germany; Department of Physics and Astronomy, University of Utah, USA; Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, Germany : Macmillan Publishers Limited, 2013. - VOL 5 : Bd. NOVEMBER 2013.

Apel Petra/ Dubbert, Dr. Wolfgang/ Mordziol, Christoph/ Oehme, Dr. Ines/ Schwirn, Dr. Kathrin/ Völker, Dr. Doris DATENBLATT NANOPRODUKTE Nanobasierte Beleuchtungssysteme : Organische Licht emittierende Diode (OLED) [Online]. - 5.. November 2013. - 14.. Januar 2018. -

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/datenblatt_nanoprodukte_nanobasierte_beleuchtungssysteme.pdf.

Bächle Michael/ Baumann, Dr. Thomas/ Rudat, Dr. Birgit/ Volz, Daniel/ Härter, Hendrik ELEKTRONIK PRAXIS [Online] // Wann schafft die OLED-Technologie den Durchbruch?. - 13.. März 2013. - 11.. Februar 2018, 12:53. - <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/wann-schafft-die-oled-technologie-den-durchbruch-a-398022/>.

Banerji Jun. Prof. Amitabh/ Joost, Dr. T./ Zepp, M Chemie-Labothek Innovative Kunststoffe & Funktionelle Farbstoffe [pdf-Datei]. - Wuppertal : [s.n.].

Banerji Jun.-Prof. Dr. Amitabh Vom Plexiglas® zum OLED-Display Konjugierte Polymere in der curricularen Innovation Dissertation [Online] // elpub.bib.uni-wuppertal.de. - 2012. - 21. Januar 2018, 16:24. - <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-3135/dc1216.pdf>.

Barnert Silvia/ Delbrück, Dr. Matthias/Eis, Dr. Reinald/ Greulich, Walter/ Fischer, Natalie/ Heinisch, Carsten/ Nagel, Sonja/ Radons, Dr. Gunnar/ MS (Optics) Lynn Schilling-Benz/ Schüller, Dr. Joachim Spektrum.de Lexikon der Physik [Online] // Strom-Spannungs-Kennlinie. - Spektrum.de, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1998. - 12. Mai 2018, 12:50. - <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/strom-spannungs-kennlinie/14082>.

Birnstock Jan Siebdruck von Displays auf Basis konjugierter Polymere [Buch]. - Aachen : SHAKER VERLAG, 2003.

Bonn Rheinische Friedrich-Willhelms-Universität Rheinische Friedrich-Willhelms-Universität Bonn / Neues [Online] // Neuartige LEDs weisen den Weg zu günstigeren Bildschirmen. - 8.. November 2013. - 8. Februar 2018, 20:40. - <https://www.uni-bonn.de/neues/262-2013>.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)Referat Photonik Optische Technologien 11055 Berlin Gestaltung: Bartkowiak GmbH & Co. KG, Tönisvorst Photonik Forschung Deutschland_Licht mit Zukunft. - Bonn, Berlin : Siebel Druck & Grafik, Lindlar, 2011.

Chauduri Debangshu [et al.] Metal-Free OLED Triplet Emitters by Side-Stepping Kasha's Rule [Artikel] // Angewandte Chemie. - Institut für Angewandte und Experimentelle Physik, Universität Regensburg; Department of Physics and Astronomy, University of Utah; Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology; Keuklé-Institut für Organische Chemie und Biochemie, Univer : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. - Internationale Edition.

Chauduri Debangshu [et al.] Metal-Free OLED Triplet Emitters by Side-Stepping Kasha's Rule [Artikel] // Angewandte Chemie. - institut für Angewandte und Experimentelle Physik, Universität Regensburg; Department of Physics and Astronomy, University of Utah; Department of Chemistry, Massachusetts Institute of Technology; Keuklé-Institut für Organische Chemie und Biochemie, Univer : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. - Internationale Edition .

Douglas C. Giancoli Physik Lehr- und Übungsbuch [Buch]. - [s.l.] : PEARSON EDUCATION DEUTSCHLAND GMBH, 2010. - Bde. 3., erweiterte Auflage.

Fraunhoferinstitut [Online] // 17 | 2017 – Flexible farbvariable OLED – neue Gestaltungsoptionen für Lichtdesigner. - Fraunhofer FEP, 12.. September 2017, 12:28. - 11.. Februar 2018. - https://www.fep.fraunhofer.de/de/press_media/17_2017.html.

Gargouri Dipl.-Ing. Hassan Carben-Emitter in organischen Leuchtdioden [Buch]. - Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig : [s.n.], 2010.

Gneuß Timo Cu(I)-Komplexe mit Tripod-Liganden – Emitter für den roten bis blauen Farbbereich [pdf-Datei]. - Marburg : [s.n.], November 2015.

Holzner Steven Quantenphysik für Dummies [Buch]. - Ulm : CPI, Ebner & Spiegel, 2015. - Bd. 1. Nachdruck.

Ibach Prof. Dr. Harald/ Lüth, Prof. D. Hans Festkörperphysik Einführung in die Grundlagen [Buch]. - [s.l.] : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002. - Bd. 6. Auflage.

Merck KGaA SIEGMA-ALDRICH PEDOT Materials [Online]. - 11.. Mai 2018. - <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/655201?lang=de®ion=DE>.

Meschede Dr. Dieter Geerthsen Physik 22., völlig neu bearbeitete Auflage [Buch]. - Würzburg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

metallpulver24 metallpulver24 [Online]. - metallpulver24, 2018. - 11.. Mai 2018, 11:38. - <https://www.metallpulver24.de/de/galinstan-10g-grundpreis-eur-2490-kg.html>.

Neidhart Christoph Süddeutsche Zeitung [Online] // Bildschirme von morgen. - 4.. Januar 2016. - 8. Februar 2018, 16:32. - <http://www.sueddeutsche.de/digital/oled-technik-bildschirme-von-morgen-1.2805097>.

ORGANIC LIGHTS ORGANIC LIGHTS [Online] // Fünf Gründe warum OLEDs die bessere Lichtquelle sind. - Lightspeed, 2016. - 11. Februar 2018, 12:46. - <http://www.organic-lights.com/de/ueber-oled/oleds-die-bessere-lichtquelle/>.

Ossila Ossila Products [Online]. - Ossila, 2018. - 11. Mai 2018, 12:40. - <https://www.ossila.com/products/pedot-pss>.

Riedel Boris Effizienzsteigerung in Leuchtdioden [Buch]. - [s.l.] : KIT Scientific Publishing, 2011.

Ruhr-Universität Bochum Photometrie [pdf-Datei]. - Bochum : [s.n.].

Schenk Erich Markt & Technik [Online] // Merck setzt auf OLED-Ink für TV-Geräte_Kommen OLED-Panels schon bald aus dem Drucker?. - Markt & Technik, 2.. November 2016. - 10.. Februar 2018, 20:21. - <http://www.elektroniknet.de/markt-technik/optoelektronik/kommen-oled-panels-schon-bald-aus-dem-drucker-135320.html>.

Schildknecht Dipl. Ing. Christoph Iridium Carben-Komplexe als Farbstoffe für tiefblaue organische Leuchtdioden [Buch]. - Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig : [s.n.], 2006.

Thuselt Frank Physik der Halbleiterbauelemente Einführendes Lehrbuch für Ingenieure und Physiker [Buch]. - [s.l.] : Springer Berlin Heidelberg, 2011. - Bd. 2. Auflage.

Winaug Ute Jana Effiziente Triplett-Emitter für Organische Leuchtdioden auf der Basis von Iridium(III)-Komplexen [Buch]. - Göttingen : CUVILLER VERLAG, 2009.