

Einführung in die OLED-Technologie

1. Allgemeine Eigenschaften

1.1. Aufbau

Eine organische Leuchtdiode (engl. organic light-emitting diode, OLED) besteht aus mehreren organischen Halbleiterschichten zwischen zwei Elektroden, von denen mindestens eine transparent ist. In Abbildung 1 sind zwei verschiedene OLED-Typen schematisch dargestellt: ein einseitig abstrahlendes Bauteil (links) und ein transparentes, das Licht sowohl nach oben als auch unten abstrahlt (rechts). Bei der Herstellung einer OLED werden organische Schichten nacheinander auf ein leitfähiges Substrat aufgebracht, gefolgt von einer weiteren leitfähigen Elektrode. Ein weitverbreiteter Aufbau basiert auf einem mit Indium zinnoxid (ITO) beschichteten Glassubstrat als transparente Anode und einer dünnen, lichtundurchlässigen Metallschicht als Kathode.

Der organische Schichtstapel (Stack) einschließlich der Elektroden ist in der Regel dünner als 1 μm . Für die Herstellung von organischen, Licht emittierenden Bauteilen werden allgemein zwei verschiedene Klassen von organischen Materialien verwendet polymere Substanzen und so genannte „Kleinmolekülmaterialien“ (engl. small molecules), die keine Orientierungseigenschaft besitzen und daher amorphe Schichten bilden. Ein interessanter Aspekt der organischen Optoelektronik ist der mögliche Einsatz von einfachen Siebdruck- oder Nassabscheidungsverfahren, die eine wirtschaftliche Herstellung großflächiger Bauteile ermöglichen. Dies trifft heutzutage nur auf organische Polymere zu. Bei der Herstellung auf Basis kleiner Moleküle müssen hingegen Aufdampfverfahren angewendet werden.

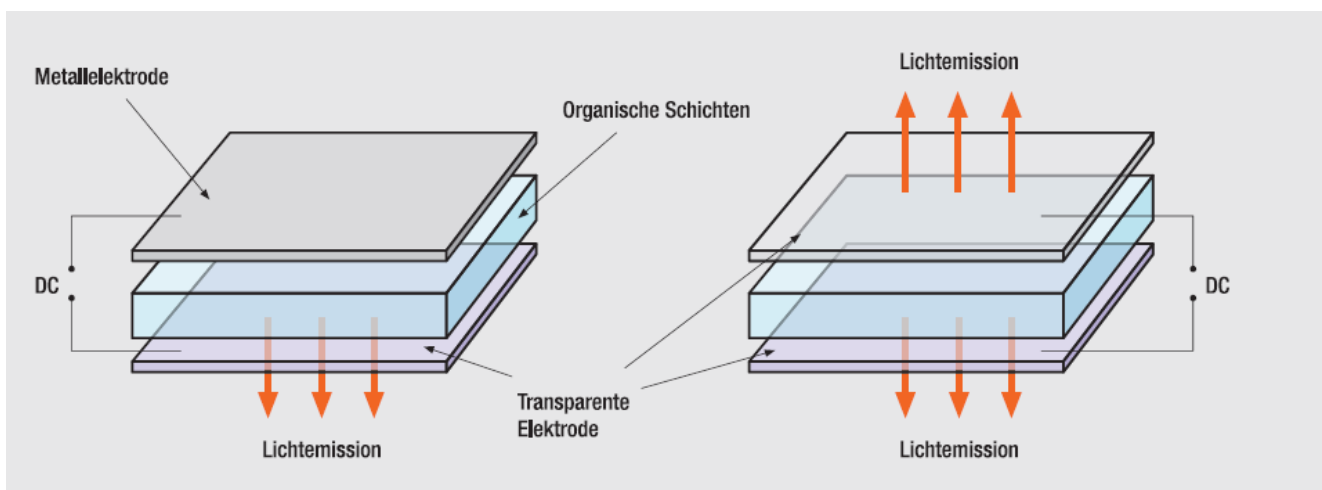


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer OLED. Links: ein einseitig abstrahlendes Bauteil. Rechts: ein transparentes Bauteil, das in beide Richtungen abstrahlt.

1.2. Hopping-Transport und Rekombination

Wird eine Gleichspannung an die Elektroden angelegt, können die injizierten Elektronen und Löcher in den organischen Schichten rekombinieren und strahlen Licht in einer bestimmten Farbe ab. Die Farbe des Lichts hängt von der Beschaffenheit des organischen Materials ab. Die Leitfähigkeit organischer Halbleiter ist um ein Vielfaches geringer als die von anorganischen Halbleitern, da der Ladungsträgertransport in organischen Halbleitern auf individuelle Hopping-Prozesse zwischen mehr oder weniger isolierten Molekülen oder entlang von Polymerketten angewiesen ist (Abbildung 2). Des Weiteren ist das Energiebändermodell mit delokalisierten Wellenfunktionen in der organischen Elektronik nicht anwendbar. Die relevanten Fachbegriffe sind nicht „Valenzband“ oder „Leitungsband“, sondern „HOMO“ (engl. highest occupied molecular orbital), das Energieniveau des höchsten besetzten Molekülorbitals, und „LUMO“ (engl. lowest unoccupied molecular orbital), das Energieniveau des niedrigsten unbesetzten Molekülorbitals. Bevor es strahlend zerfällt, bildet ein Elektronen-Loch-Paar in einem Zwischenschritt ein Exziton, das schließlich Licht abstrahlt, wenn es zerfällt. Ein Farbstoffmolekül ist entweder ein fluoreszierender oder phosphoreszierender Emitter. Nur in phosphoreszierenden Emittern können alle Exzitonen – Singulett- und Triplett-Exzitonen – strahlend zerfallen. In fluoreszierenden Emittern hingegen strahlen drei Viertel der Exzitonen – die Triplett-Exzitonen – kein Licht ab. Es wird folglich ein maximaler intrinsischer Wirkungsgrad von nur 25 % erreicht, weshalb der Einsatz von fluoreszierenden Emittern möglichst vermieden wird. Bislang ist jedoch die Lebensdauer phosphoreszierender Emitter, vor allem bei kurzen Wellenlängen (Blau), geringer als die Lebensdauer fluoreszierender Emitter.

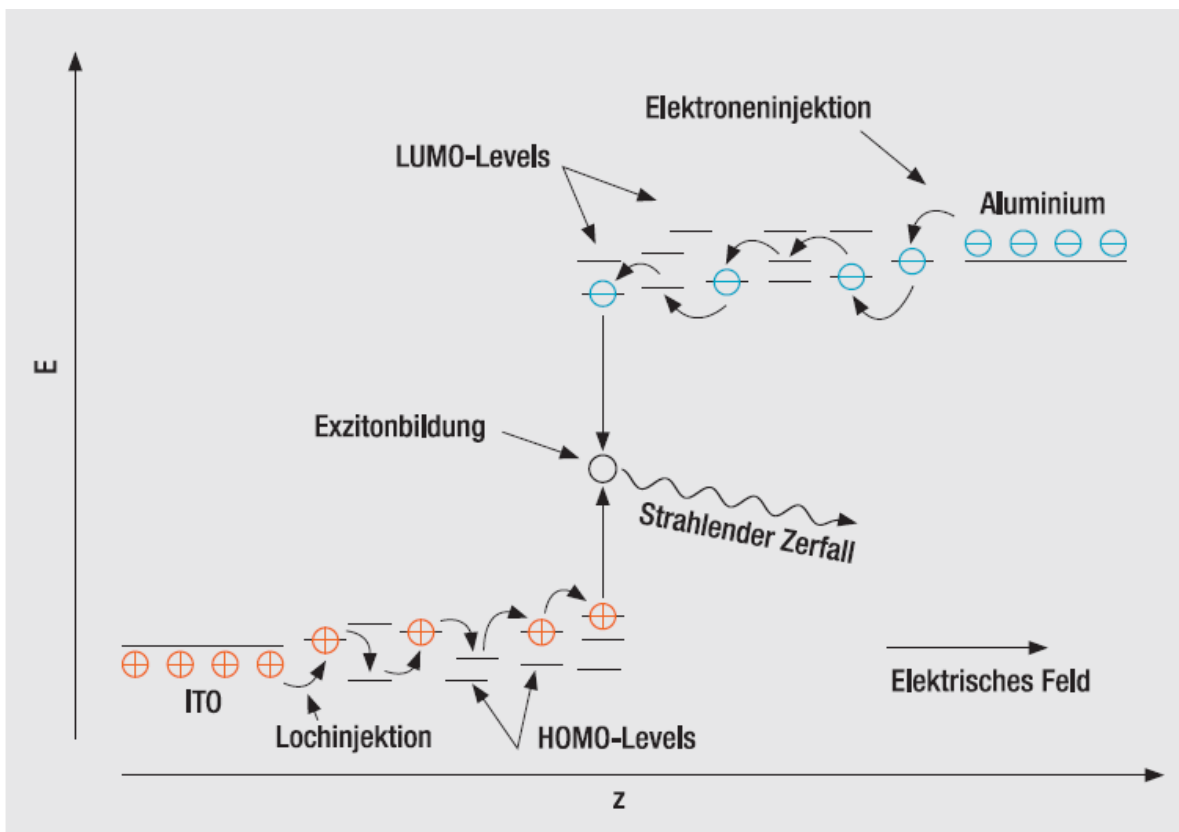


Abbildung 2: Hopping-Transport und Rekombination in einer OLED.

1.3. Emissionsspektrum

Organische Moleküle haben in der Regel ein breites Emissionsspektrum (Abbildung 3). Wie bereits erwähnt, bestimmt das Material die Farbe des abgestrahlten Lichts. Aus diesem Grund kann die Emission auf praktisch jede Farbe, einschließlich Weiß mit jeder möglichen Farbtemperatur, abgestimmt werden, indem mehrere verschiedene Schichten in einem Bauteil gestapelt werden. Dies ist möglich, da organische Schichten im sichtbaren Spektralbereich nahezu transparent sind. Die meisten weißen OLED bestehen aus einer roten, einer grünen und einer blauen Emissionsschicht, die zusammen hochwertiges weißes Licht erzeugen.

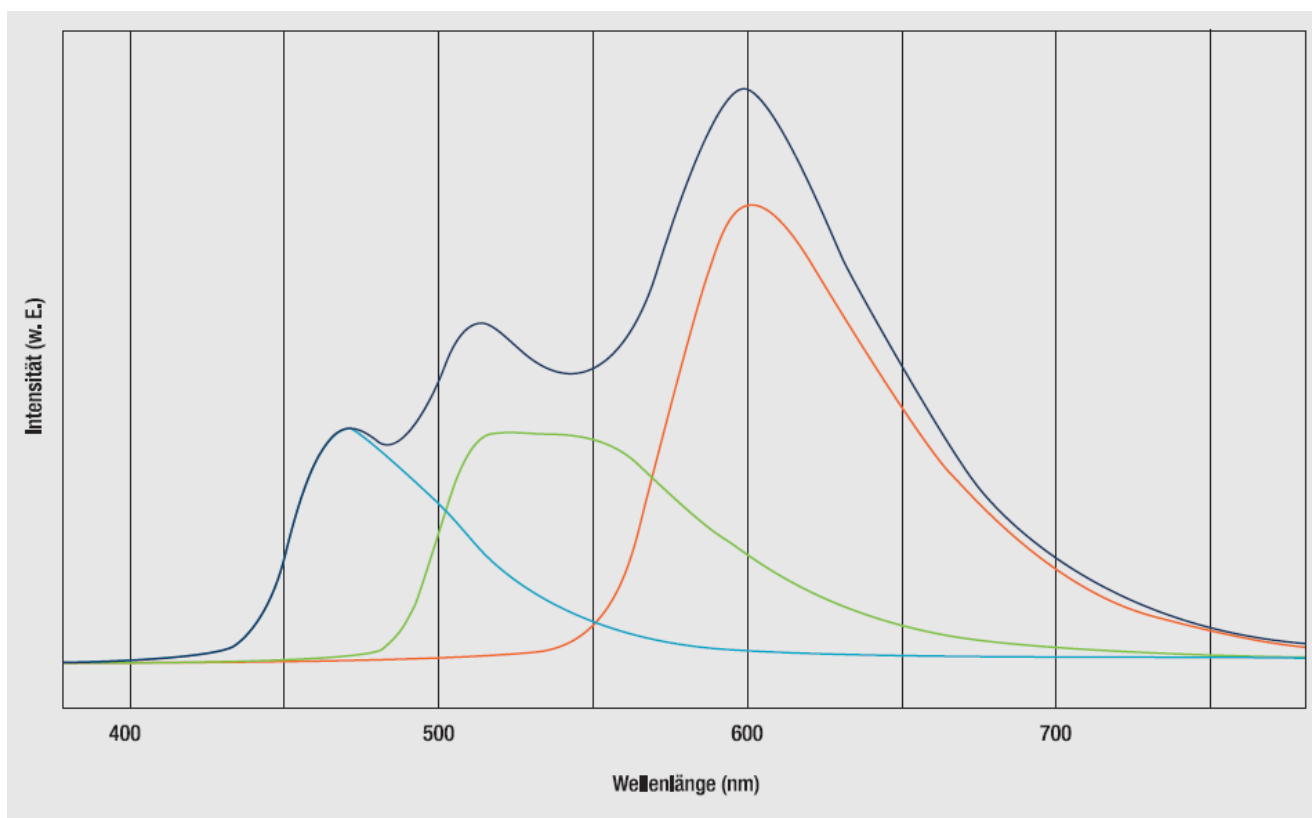


Abbildung 3: Typische Emissionsspektren organischer Materialien. Das Diagramm zeigt Spektren von roten, grünen und blauen Emittoren und deren Überlagerung, die weißes Licht mit einem hohen Farbwiedergabeindex ergibt.

1.4. Dotierung

Bei organischen Halbleitern nutzt man Dotierung zur Steigerung der Leitfähigkeit des Materials und zur Verbesserung der Trägerinjektion der Elektroden in die organischen Materialien. Dies ermöglicht die Entwicklung von Bauteilen mit intrinsisch undotierten aktiven Schichten, die von p- und n-dotierten Schichten eingeschlossen werden und deshalb auch „PIN-Dioden“ genannt werden. Zusätzlich zur Verbesserung der elektrischen Leistung bietet eine solche Bauweise die Möglichkeit, die Bauteildicke bei gleichbleibender Betriebsspannung zu erhöhen. Die Gesamtdicke des Bauteils zwischen den Elektroden sollte einige Hundert Nanometer betragen, um einen ausreichenden Schutz gegen Kurzschlüsse zu

gewährleisten. Diese werden oft durch Partikel, die während des Aufdampfens der organischen Schichten auf dem Substrat auftreten, oder durch Unebenheiten auf dem Substrat verursacht. Eine Dotierung ermöglicht auch die Reihenschaltung mehrerer aktiver Schichten innerhalb eines Bauteils (Abbildung 4). Ein PN-Übergang zwischen den Schichten, der in Sperrrichtung betrieben wird, verhält sich wie ein Tunnelkontakt: Die Ladungsträger bewegen sich direkt vom HOMO-Level der einen Schicht zum LUMO-Level der angrenzenden Schicht. In der OLED Community werden diese Übergänge oft „Ladungserzeugungsschichten“ (engl. charge generation layers, CGLs) genannt, da Elektronen-Loch-Paare an der Übergangsstelle gebildet und durch das elektrische Feld getrennt werden. Den Aufbau eines Bauteils mit immanenter Reihenschaltung bezeichnet man als „Stacking“ (engl. für Stapeln). Ein weißes Bauteil mit beispielsweise zwei Schichten erreicht grundsätzlich die gleichen Leuchtdichtewerte wie ein einfaches Bauteil, benötigt aber halb so viel Strom, da es zwei Emissionsschichten hat, und eine doppelt so hohe Spannung. Im Vergleich zu einfachen PIN-Bauteilen bieten mehrschichtige Bauteilarchitekturen mehrere Vorteile hinsichtlich Lebensdauer, optischen Eigenschaften etc. Auf diese wird später noch näher eingegangen.

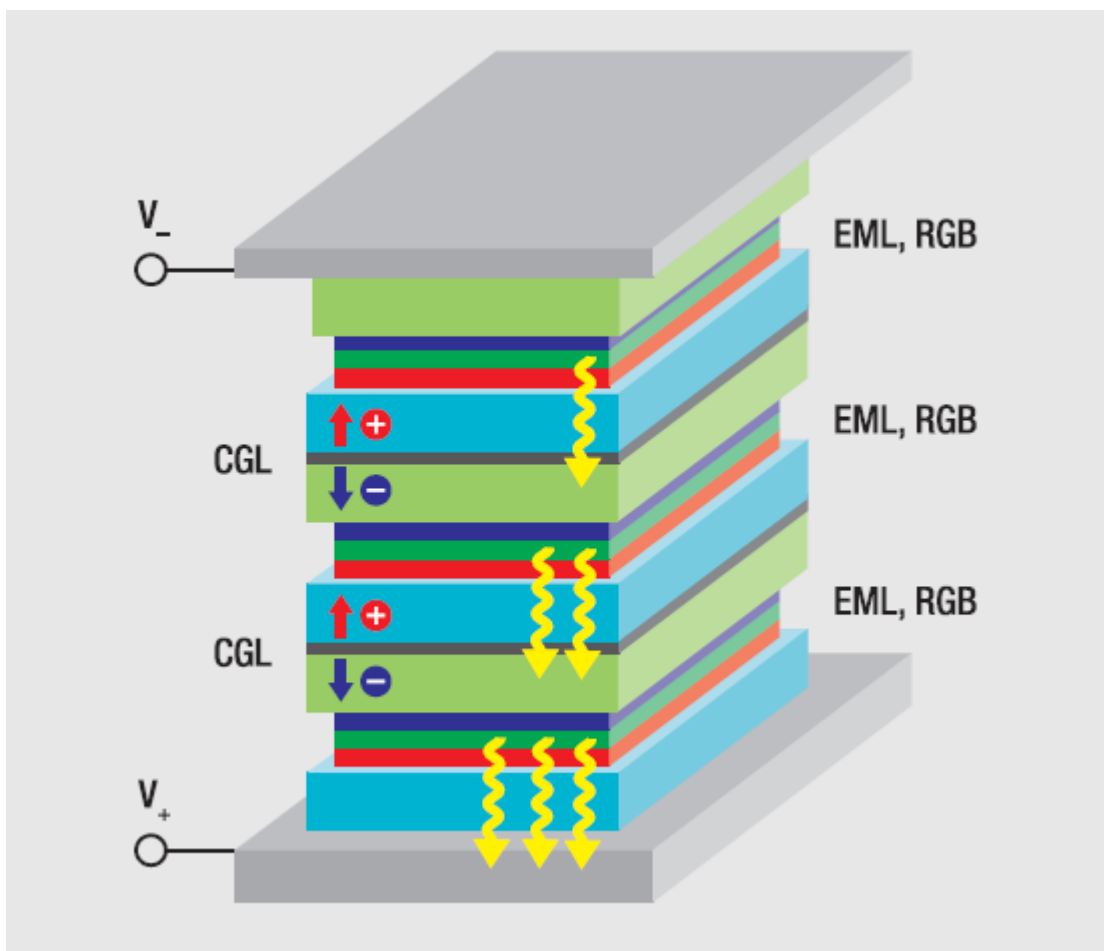


Abbildung 4: Mehrschichtige Bauteilarchitektur.

1.5. Verkapselung

Die organischen Schichten müssen vor Luft geschützt werden, da sie empfindlich gegen Feuchtigkeit und Sauerstoff sind und im ungeschützten Zustand degradieren. Abbildung 5 zeigt eine mögliche Verkapselungstechnik. Man sieht eine dünne, aber sehr dichte amorphe Oxidschicht, die auf der Kathode aufgebracht ist und eine ausreichende Permeationsbarriere bietet. Aufgrund ihrer geringen Dicke muss diese sog. „Dünnschichtverkapselung“ (engl. thin-film encapsulation, TFE) vor mechanischen Schäden geschützt werden, zum Beispiel durch Auflaminieren einer zusätzlichen Glasschicht oder durch Aufbringen einer Lackbeschichtung.

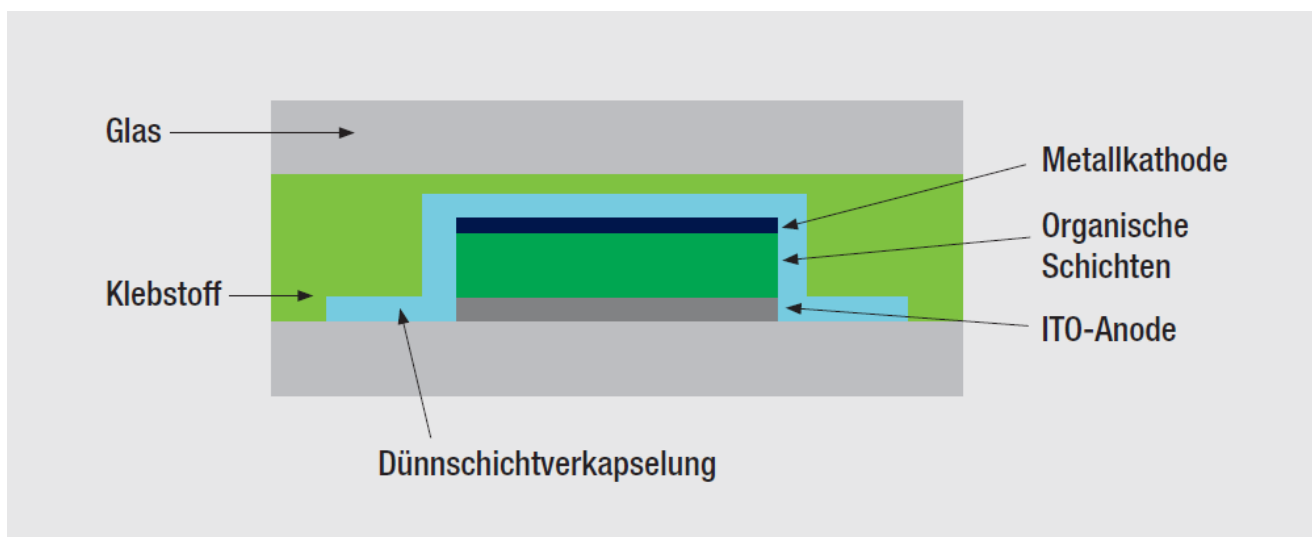


Abbildung 5: Dünnschichtverkapselung.

1.6. Optischer Resonator

Das dünne Schichtsystem einer OLED bildet einen optischen Resonator in Richtung der Oberflächennormale, d. h. ein optisches System mit einer Gesamtdicke von einigen Wellenlängen des abgestrahlten Lichts und je einem Spiegel an jedem Ende. Eine OLED ist streng genommen ein Halbresonator, da sich nur die Metallkathode wie ein echter Spiegel verhält. Abhängig von der Dicke und den Brechungsindizes der Materialien erzeugt der Resonator bei Licht einer bestimmten Wellenlänge eine oder mehrere Resonanzen. Je höher der Abstrahlwinkel ist, mit dem die Lichtstrahlen das Bauteil verlassen, desto mehr verschiebt sich die Farbe des emittierten Lichts.

Dementsprechend kann die Emissionsfarbe einer OLED stark vom Abstrahlwinkel abhängen. Diese Abhängigkeit kann durch eine kluge Auslegung der Schichtdicken sowie der Position der Emittiererschichten gegenüber der reflektierenden Kathode minimiert werden. Dies bedeutet auch, dass es bei der Lichterzeugung innerhalb eines Resonators immer eine optimale Position gibt, von der aus ein Emittierer das Licht einer bestimmten Wellenlänge mit höchster Effizienz abstrahlt. Diese optimale Position wird durch die Anpassung der Schichtdicken der nicht emittierenden Schichten erreicht.



1.7. Wellenleitende Eigenschaften

Der Stack bildet nicht nur einen Mikroresonator, sondern besitzt zudem auch wellenleitende Eigenschaften. Die Lichterzeugung in den aktiven Schichten erfolgt isotrop, aber nur ein kleiner Anteil des Lichts verlässt tatsächlich das Bauteil.

Dieser Anteil befindet sich innerhalb des sog. „Austrittskegels“, der durch die Bedingung der inneren Totalreflexion an den Übergängen definiert ist. Der weit größere Anteil (ca. 85 %) geht durch Wellenleitung in den organischen Schichten und im Substratglas verloren. Diese Einschränkung kann umgangen werden, indem man zusätzlich einen Diffusorfilm auf das Substratglas aufbringt, der an dessen Brechungsindex angepasst ist und Licht streuende Partikel enthält.

In einem solchen Fall dringt Licht, das sich im Substrat befindet, in den Diffusorfilm ein, verändert durch Ablenkung an einem Partikel seine Richtung und verlässt den Diffusorfilm schließlich in einem geeigneten Winkel. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass mehr Licht genutzt wird und somit eine höhere Gesamtleistung des Bauteils und eine bessere Farbmischung aufgrund der statistischen Streuung aller Wellenlängen erreicht wird.

Dies hat eine weitaus geringere Winkelabhängigkeit der Emissionsfarbe zur Folge. Der einzige Nachteil eines Diffusorfilms ist der Verlust der spiegelähnlichen Erscheinung des Bauteils im ausgeschalteten Zustand, wenngleich der Diffusorfilm selbst eine hochglänzende Oberfläche besitzt.

1.8. Leitfähigkeit

Eine große Herausforderung großflächiger OLED ist die eingeschränkte Leitfähigkeit des Elektrodenmaterials, insbesondere der transparenten leitfähigen Oxide (engl. transparent conducting oxides, TCOs). Die Leitfähigkeit zum Beispiel von Indiumzinnoxid (ITO) ist um etwa zwei Größenordnungen geringer als die von Aluminium. Dies führt zu einem signifikanten Spannungsabfall in der transparenten Elektrode und verursacht – abhängig vom Abstand zu den elektrischen Kontakten – eine Abnahme in der lokalen Betriebsspannung der aktiven Schichten. Infolgedessen verringert sich die Strahlungsintensität von den Rändern hin zum Mittelpunkt des Bauteils. Zur Abmilderung des lateralen Spannungsabfalls können leitfähige Hilfsstrukturen aus Metall auf die ITO-Anode aufgebracht werden: Während dies die durchschnittliche Leitfähigkeit der Anode erhöht, wird nur ein geringer Anteil der aktiven Fläche abgeschattet und so eine gleichmäßigere Leuchtdichteverteilung erzielt.

Die Ersatzschaltung für ein großflächiges Bauteil ist eine Reihenschaltung von drei Widerständen, welche die Anode, die organischen Schichten und die Kathode repräsentieren. Je höher der differentielle Widerstand der organischen Schichten am Betriebspunkt ist, desto geringer ist der Spannungsabfall entlang der Elektroden, was zu einer verbesserten Homogenität der Leuchtdichte führt. Da mehrschichtige Bauteilarchitekturen einen weitaus höheren differentiellen Widerstand haben, ist „Stacking“ eine Methode, mit der die Homogenität bzw. Leistung von großflächigen Bauteilen auch ohne den Einsatz von Hilfsstrukturen verbessert werden kann.



1.9. Lebensdauer

Während der Lebensdauer einer OLED fällt die Leuchtdichte unter Konstantstrom monoton ab. Der Widerstand und somit auch die Betriebsspannung steigen entsprechend an. Die Lebensdauer hängt überlinear von der emittierten Strahlungsintensität (bzw. Stromdichte) und der Temperatur ab. Insbesondere die Temperatur muss bei der Entwicklung von OLED-Leuchten berücksichtigt werden. Beim Betrieb von großflächigen Bauteilen mit einer hohen Leuchtdichte können deutlich erhöhte Temperaturen auftreten. Es sollte eine Wärmeableitung an die Umgebung sichergestellt werden, um eine lange Lebensdauer des Bauteils zu erreichen. In diesem Fall bieten mehrschichtige Bauteilarchitekturen bei konstant bleibender Helligkeit die Möglichkeit, die Helligkeit jedes einzelnen Abschnitts zu vermindern, wodurch Alterungsmechanismen verlangsamt werden.

1.10. Besondere Eigenschaften

OLED haben mehrere besondere Eigenschaften:

- Sie können sehr dünn und daher sehr leicht sein. Diese Eigenschaft ist vorwiegend bedingt durch die Dicke des Substrats und der Verkapselung.
- Sie sind blendfreie Flächenlichtquellen, die im ausgeschalteten Zustand transparent sein können oder ein spiegelähnliches oder milchiges Erscheinungsbild haben.
- Sie bieten eine hohe Farbqualität und nach dem Anschalten sofort volle Leistung.
- Sie haben das Potenzial, mit Leuchtstofflampen in Bezug auf Effizienz und Lebensdauer gleichzuziehen oder sie sogar zu übertreffen, und sind dabei 100 % quecksilberfrei.
- Sie erzeugen weder UV- noch IR-Strahlung.
- Zukünftige Produkte, die auf OLED-Technologie basieren, könnten sogar formbar oder flexibel sein.

2. Elektro-optische Eigenschaften

2.1. Abstrahlung

OLED sind in guter Näherung Lambert-Strahler, d. h. sie erscheinen unabhängig vom Betrachtungswinkel immer gleich hell. Diese Eigenschaft kann bis zu einem bestimmten Grad modifiziert werden, indem man die Beschaffenheit des Mikroresonators verändert. Eine effektive Formung der Abstrahlung ist nur mithilfe von zusätzlichen externen optischen Elementen wie z. B. Mikrolinsen-Arrays möglich. Wie bereits erwähnt, weist die Emissionsfarbe einer OLED eine deutliche Winkelabhängigkeit auf, die durch das Aufbringen eines Diffusorfilms auf der emittierenden Oberfläche minimiert werden kann. Wie Abbildung 6 zeigt, kann die Winkelverschiebung einer Farbe im CIE-Farbraum mittels eines Diffusorfilms um mehr als eine Größenordnung verringert werden – bei gleichzeitiger Steigerung der Auskopplungseffizienz um bis zu 50 %.

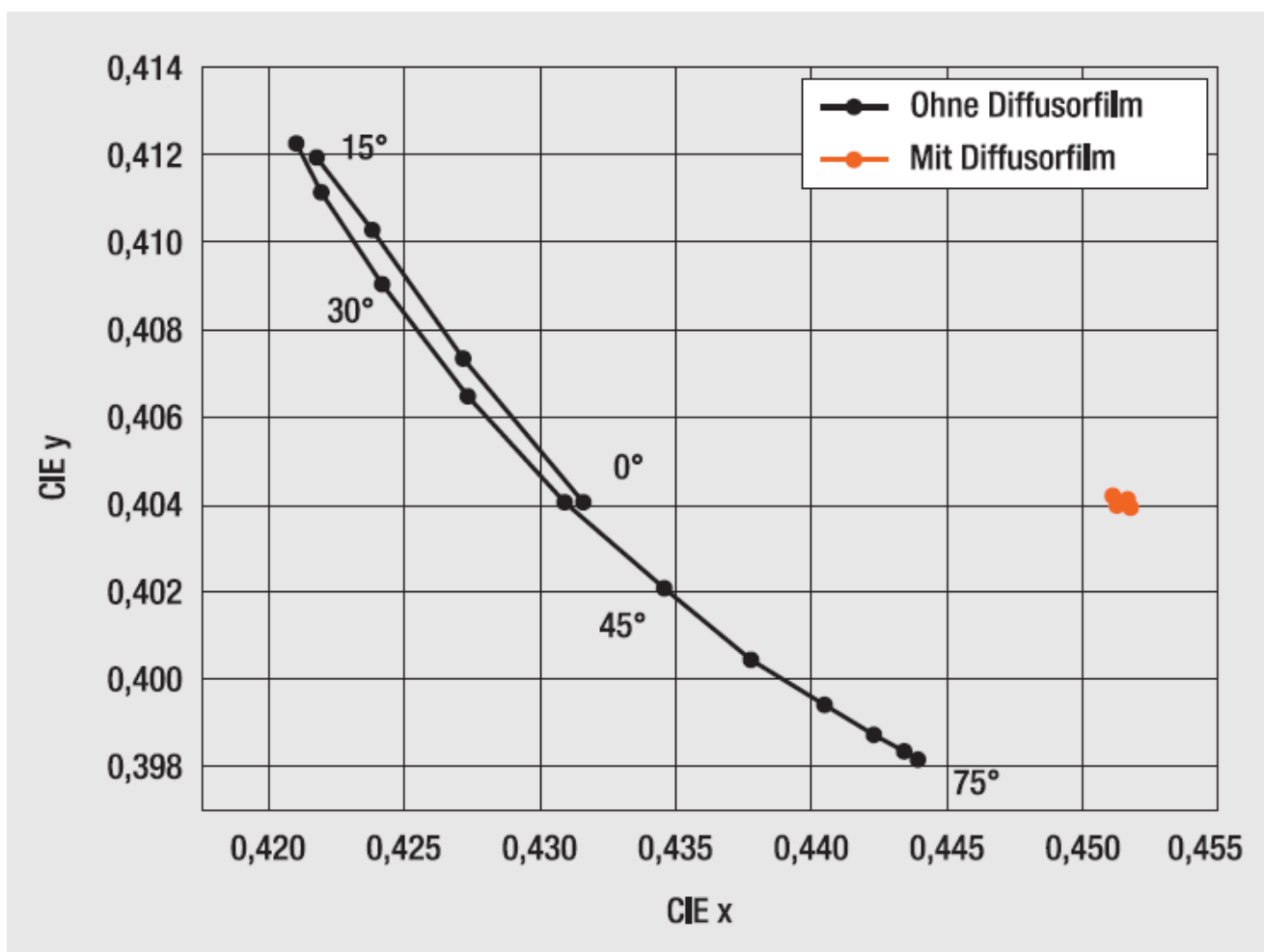


Abbildung 6: Farbkoordinaten der Abstrahlung einer OLED unter verschiedenen Betrachtungswinkeln von 0° bis 75° ohne und mit Diffusorfilm.



2.2. Strahlungsintensität

Die Strahlungsintensität von OLED wird im Allgemeinen durch ihre Leuchtdichte bestimmt. Die Leuchtdichte ist ein Maß für die Lichtstärke pro Flächeneinheit des in eine bestimmte Richtung abgestrahlten Lichts. Die Maßeinheit der Leuchtdichte ist cd/m^2 und wird oft auch „nit“ genannt. Typische Leuchtdichtewerte liegen zwischen 300 cd/m^2 (Stimmungsbeleuchtung) und einigen Tausend cd/m^2 (Allgemeinbeleuchtung). Dies ergibt einen Lichtstrom von 10 bis 100 Lumen bei einer Bauteilfläche von 100 cm^2 . Die Wirkungskraft von OLED und anderen Lichtquellen wird in Lumen pro Watt gemessen und wird „Lichtausbeute“ genannt. Spezifikationen geben mitunter auch die externe Quantenausbeute an, die die Anzahl der erzeugten Photonen in Beziehung zur Anzahl der injizierten Elektronen-Loch-Paare setzt.

2.3. I-V- und I-L-Charakteristik

Abbildung 7 zeigt eine typische relative elektro-optische Charakteristik. Die Leuchtdichte verhält sich in guter Näherung direkt proportional zum Betriebsstrom. Abhängig von der Anzahl der Emitterschichten werden mehrschichtige Bauteile bei einem Vielfachen der Betriebsspannung eines einfachen Bauteils betrieben. Gleichzeitig ist der Betriebsstrom geringer, sodass die Lichtausbeute beider Bauteilarchitekturen ungefähr gleich ist. Da jedoch der differentielle Widerstand, d. h. die Steigung der Spannungs-Leuchtdichte-Charakteristik, verringert wird, sind mehrschichtige Bauteilarchitekturen für die Herstellung von großflächigen Bauteilen besser geeignet (siehe Abschnitt 1.4.).

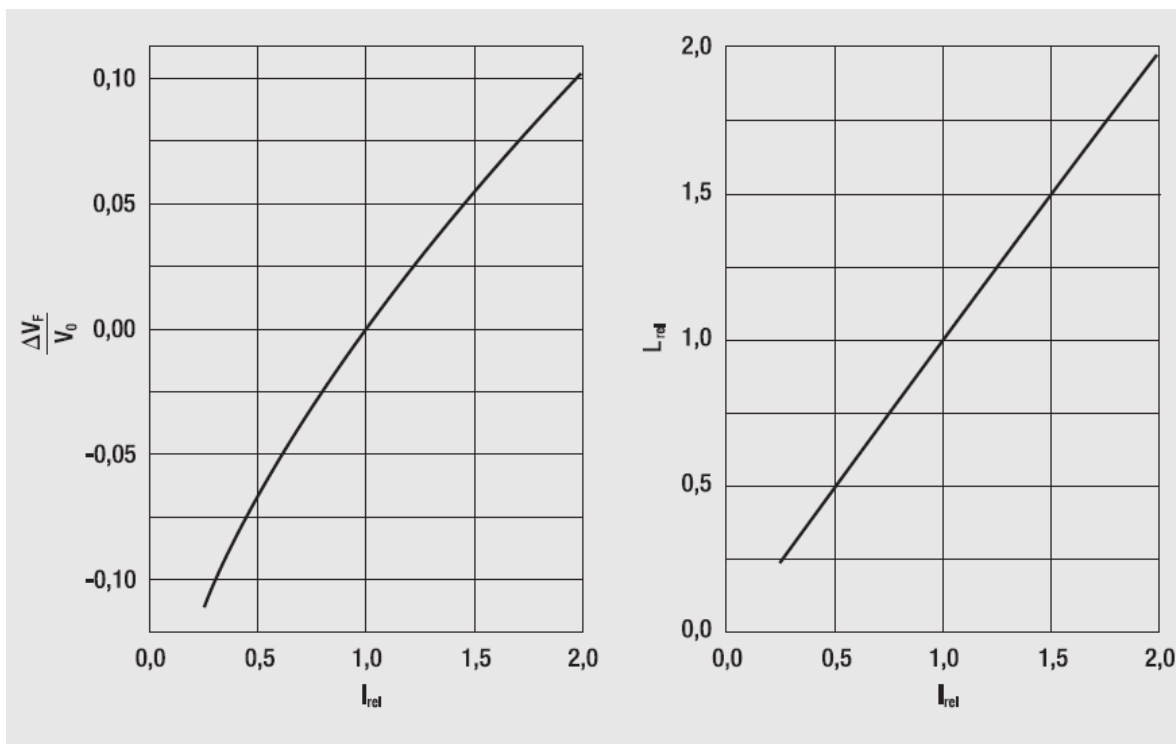


Abbildung 7: I-V-Charakteristik (links) und I-L-Charakteristik (rechts) in relativen Einheiten. Ein relativer Strom bzw. eine relative Leuchtdichte von 1 und eine Spannung von 0 beziehen sich auf typische Betriebsbedingungen.



2.4. Farbwiedergabeindex

Der Farbwiedergabeindex (engl. color rendering index, CRI) ist ein quantitatives Maß für die Fähigkeit einer Lichtquelle, die Farben verschiedener Objekte ähnlich einer natürlichen Lichtquelle zu reproduzieren. Ein CRI von 100 bedeutet, dass die Lichtquelle die gleichen Beleuchtungseigenschaften besitzt wie eine Glühlampe (CCT < 5.000 K) oder Tageslicht (CCT > 5.000 K). Jeder Wert unter 100 gibt ein Defizit in mindestens einem der Spektralbereiche an. Wie in Abschnitt 1.3. erwähnt, haben organische Moleküle normalerweise ein breites Emissionsspektrum und ein CRI von über 80 kann leicht durch die Kombination eines roten, eines grünen und eines blauen Emitters erreicht werden (siehe Abbildung 3). Das Emissionsspektrum verdeutlicht auch, dass OLED weder UV- noch IR-Strahlung abgeben.

OSRAM OLED GmbH

Head Office:

Wernerwerkstrasse 2
93049 Regensburg, Germany
Phone +49 941 850-0
www.osram-oled.com