

11/12 2009

November/Dezember 2009

61. Jahrgang

ISSN 0024/2861

Pflaum Verlag GmbH & Co.KG

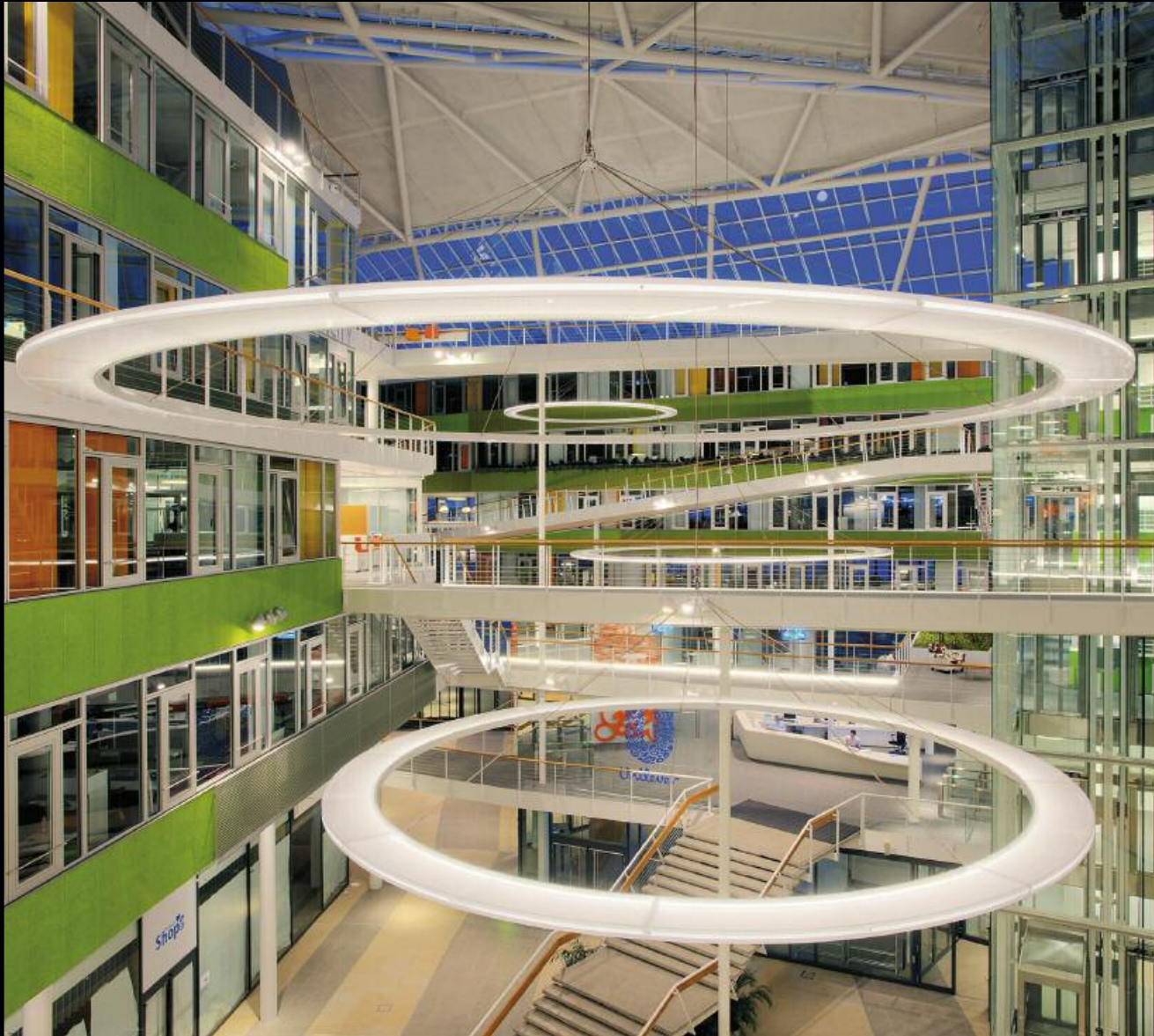
Postfach 19 07 37

80607 München

LICHT

PLANUNG · DESIGN · TECHNIK · HANDEL

<http://www.LICHTnet.de>



Repräsentative Beleuchtung

with english summaries

Organische Leuchtdioden und ihre Zukunft in der Allgemeinbeleuchtung

OLED: Anwendungen, Stand der Technik und Perspektiven

Dominique Wagner, Ralph Wagner

1 Einleitung

Organische Leuchtdioden (OLED) werden als großflächige Lichtquellen noch nie gesehene Lichteindrücke in der Innenarchitektur, Lichtwerbung und Produktpräsentation ermöglichen. Beliebige Farben oder weißes Licht werden effizient und homogen von Oberflächen abgestrahlt, die im ausgeschalteten Zustand transparent oder spiegelnd sind. Damit eröffnen sich ganz neue Anwendungen der Lichttechnik.

Bei OLEDs strahlt eine große Fläche diffuses Licht ab, ähnlich dem Effekt der indirekten Beleuchtung oder dem diffusen Himmelslicht. Diese flächige Lichtverteilung unter-

Dipl.-Ing. (FH) Dominique Wagner,
Regensburg, Dr. rer. nat. Ralph Wagner,
Regensburg

Merkmale der OLED

- diffuse flächige Abstrahlung
- großflächig, vielfarbig
- extrem dünne Bauweise
- variable Form
- maximaler Lichtstrom ist sofort nach dem Einschalten verfügbar
- transparente oder spiegelähnliche Fläche im abgeschalteten Zustand
- sehr effiziente Umwandlung von elektrischer Energie in Lichtenergie
- geringes Gewicht
- flexible Lichtquellen werden realisierbar, bei nasschemischer Prozessierung eventuell sogar leuchtende Tapeten
- elektronische Farbkontrolle möglich
- vergleichsweise umweltfreundlich (insbesondere frei von Quecksilber)

scheidet die OLED ganz wesentlich von Punktlichtquellen wie der Glühlampe oder der anorganischen LED.

Während für letztere anorganisch dotierte Halbleiter zum Einsatz kommen, bestehen die organischen Leuchtdioden (OLED = Organic Light Emitting Device/Diode) aus sehr dünnen organischen halbleitenden Schichten, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung Licht abstrahlen. »Organisch« steht hierbei für Materialien mit Kohlenstoff-Verbindungen.

Ähnlich wie sich die LED von der Signalanzeige zur Beleuchtungsquelle entwickelt hat, ist die OLED derzeit dabei, ihren Weg vom Handy- und mp3-Player-Display zur Lichtquelle zu durchlaufen.

2 Geschichte

Die Geschichte der OLED-Technologie begann bereits 1953. Damals beobachtete André Bernanose (1912 – 2002) eine Lichtaussendung bei organischen Materialien (Acridin Orange und Quinacridin), die einem starken elektrischen Wechselfeld ausgesetzt waren [1, 2]. Diese Materialien hatten selber jedoch keine nennenswerte elektrische Leitfähigkeit.

Einen Grundstein für die OLED legten 1977 die Entdeckung und Entwicklung von leitenden Polymeren, zu denen die meisten Kunststoffe gehören. Im Jahr 2000 erhielten die drei Wissenschaftler Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid und Hideki Shirakawa für ihre diesbezügliche Arbeit den Nobelpreis für Chemie [3]. Diese Polymere leuchteten zwar noch nicht, sollten aber zwölf Jahre später den entscheidenden Anstoß für die OLED bringen.

Zunächst entdeckte jedoch der Chemiker Chin W. Tang in der Forschungsabteilung von Eastman Kodak 1979 die Elektrolumineszenz organischen Materials bei moderaten Gleichspannungen (< 10V). Bei der

Arbeit mit Solarzellen beobachtete er ein blaues Leuchten. 1987 stellten Tang und Steve Van Slyke die ersten Leuchtdioden aus dünnen organischen Schichten vor [4].

Der prinzipielle Aufbau des Schichtsystems mit jeweils separater Transportschicht für Löcher und Elektronen und deren Rekombination in der dazwischen liegenden organischen Schicht (Bild 1) ist bis heute weitgehend gleich geblieben. Er ermöglichte einen entscheidenden Schritt bei der Steigerung der Effizienz.

In der Folge entschieden sich erst Kodak und kurz darauf Pioneer, in diese Zukunftstechnologie zu investieren. Aus den 1980er Jahren stammen daher auch die Grundpatente für die OLED. Zu nennen ist hier z. B. das US-Patent 4356429 von 1982, auf dem über 300 weitere Patente bis 2009 aufbauen. Insgesamt sind mehr als 6000 Patente zu dem Thema bekannt.

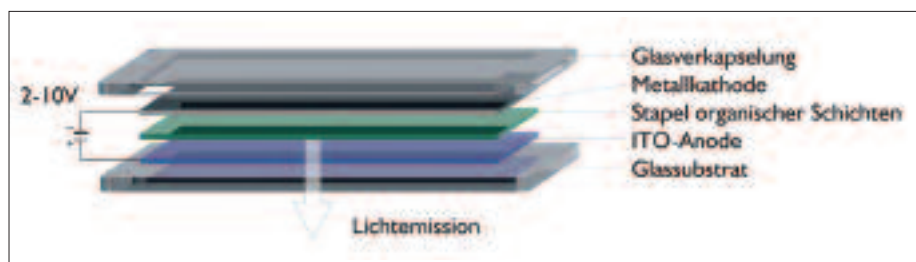
Richtig Triebkraft bekam die Entwicklung nach 1989 als Richard Friend, Jeremy Burroughes und Donal Bradley von der Cambridge Universität Polymermaterialien zum Leuchten brachten und damit die beiden Effekte – leuchtende organische Materialien und hochleitende Polymere – kombinierten [5].

Von diesem Zeitpunkt an stieg das Interesse von Wissenschaft und Forschung an den viel versprechenden Vorteilen der OLED und führte innerhalb von zehn Jahren zu den ersten kommerziellen Produkten. Dies waren zunächst Informations- und Signalanzeigen. Mittlerweile hat die OLED einen bedeutenden Anteil am Kleindisplaymarkt. OLED zur Beleuchtung werden seit circa 1999 entwickelt und machen mit guten fünf Jahren Verzögerung zur LED ebenso rasante Fortschritte in Effizienz und Lebensdauer.

3 Eigenschaften der OLED, Vor- und Nachteile

Das wirtschaftliche Potential und die Anwendungsmöglichkeiten der OLED-Technologie sind beachtlich. Die OLEDs sind leicht, dünn, flexibel. Neben der diffusen, flächigen Abstrahlcharakteristik eröffnen auch die transparente oder spiegelnde Ausföhrung der aktiven Fläche interessante funktionale und gestalterische Optionen. Die OLED bietet ein großes Spektrum an

1 Prinzipieller Schichtaufbau einer organischen LED



möglichen Farben. Die spektrale Emission ist breitbandiger als bei den LED, was das Realisieren einer guten Farbwiedergabequalität vereinfacht.

Die OLED wird mit skalierbarer Flächigkeit, frei wählbarer Kontur und Transparenz bislang nicht gekannte Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Allerdings führt, wie bei der LED, auch bei der OLED die Bauteilerwärmung zur Beeinträchtigung der Lebensdauer. Jedoch wirken der jouleschen Erwärmung im Betrieb konvektive und radiative Wärmeabfuhr über die ausgedehnte Bauteilfläche entgegen.

Durch ihre unterschiedliche Abstrahlcharakteristik und Leuchtdichte bedienen LED und OLED überwiegend komplementäre Anwendungen, so dass nicht damit zu rechnen ist, dass eine der beiden Techniken völlig verdrängt wird. Nur ein deutlicher Kostenvorteil könnte die eine oder andere Technik langfristig dominieren lassen.

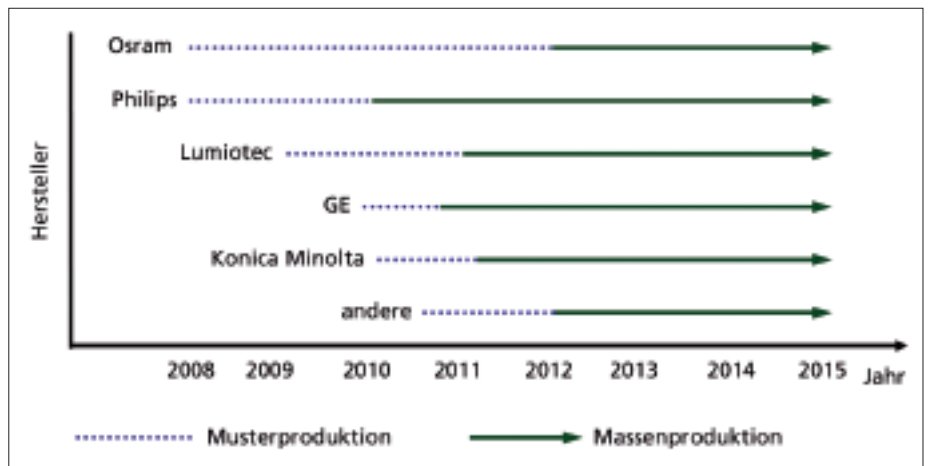
Schon heute ist die OLED doppelt so effizient wie eine herkömmliche Energiesparlampe. Man bekommt also für wenig elektrische Energie eine sehr große Lichtmenge. Zudem besitzt die organische Leuchtdiode ein Vielfaches der Lebensdauer einer Glühlampe. Während rote und grüne OLEDs bereits eine Lebensdauer von geschätzten 50 000 bis 250 000 h (bei 1000 cd/m²) aufweisen, liegt der Wert bei blauen allerdings deutlich unter 20 000 h. Dabei ist die Lebensdauer immer an die Leuchtdichte gekoppelt. Als Lebensdauer bezeichnet man in der Halbleiterindustrie üblicherweise die mittlere Betriebszeit, nach der die Leuchtdichte auf die Hälfte der Anfangshelligkeit abgesunken ist (LT50). Im Zusammenhang mit OLED für Allgemeinbeleuchtung setzt sich immer mehr die Angabe von LT70 für ein Absinken auf 70% der Anfangshelligkeit durch.

Die Investitionskosten machen eine OLED für die Allgemeinbeleuchtung momentan noch unrentabel. So kostet ein OLED-Modul mit 1000 lm heute über 1000 gegenüber der gleich hellen LED für 40 €. Auch wenn künftige OLED-Leuchten eher komplementär zu bestehender Technik sein werden, müssen

	Glühlampe	weiße LED	OLED
Rentabilität	klein	groß	noch unrentabel
Abstrahlcharakteristik	Punkt, kugelförmig	Punkt, einseitig	Fläche ein- oder zweiseitig
Lebensdauer	circa 1000 h	sehr groß, 10 000 – 50 000 h	noch vergleichsweise klein 5000 – 10 000 h, geschätzt 30 000 h im Jahr 2010
erste kommerzielle Produkte	seit den 1890er Jahren	seit 1995	2009/2010
breiter Markteintritt	Beginn des 20. Jahrhunderts	2008 – 2010	nach 2014

Tabelle 1: Vergleich von Glühlampe, weißer LED und OLED

2 Die Hersteller von OLED-Modulen planen bereits den Einstieg in die Massenproduktion. Philips könnte möglicherweise bereits 2010 damit beginnen. (Quelle: displaysearch.com)



sie doch auf einem vergleichbaren Preisniveau verfügbar sein. Erste Anwendungen werden ab 500 €/m² interessant. Für die Allgemeinbeleuchtung sollte der Preis besser unter 50 €/m² liegen.

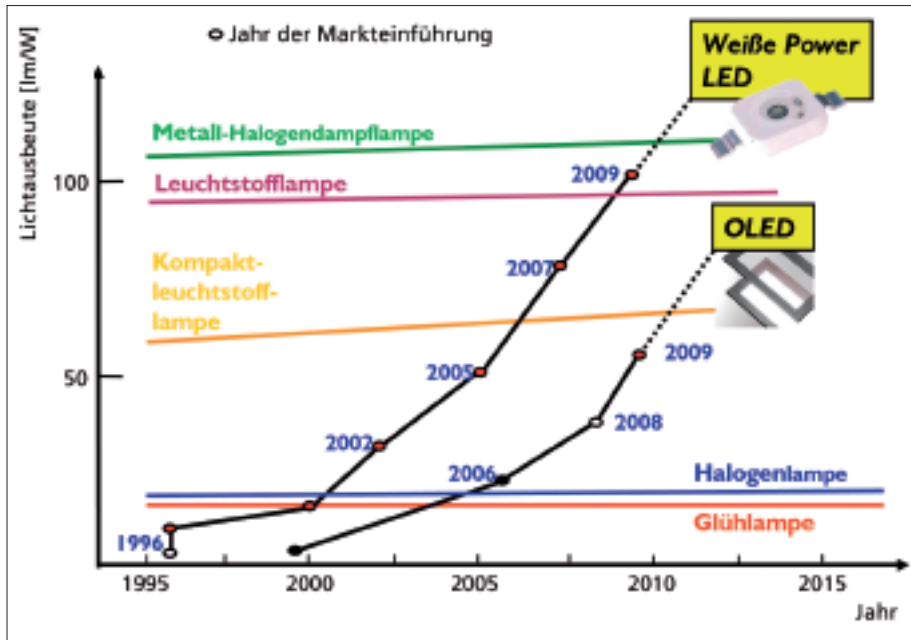
4 Einsatzmöglichkeiten und Visionen

Die OLED findet derzeit hauptsächlich als selbstleuchtendes Display Verwendung. Erste ernst zu nehmende Produkte in der Allgemeinbeleuchtung, die über Designstudien und Technikdemonstrationen hinaus gehen, sind in naher Zukunft zu erwarten. Diese werden jedoch eher kleinflächige Module (< 20 cm Kantenlänge) verwenden. Die Abmessungen der heute für Beleuchtung brauchbaren Einzelflächen liegen nur knapp über 10 cm x 10 cm. Erste kommerzielle Produkte in höheren Stückzahlen erwartet die Branche im Laufe der nächsten Jahre. Einen

breiten Markteintritt prognostiziert sie der OLED frühestens für das Jahr 2014. Mit fortschreitender Entwicklung wird sich die OLED immer mehr Anwendungsbereiche erobern. Anfangs denkbar sind:

- hochwertige Effekt-Leuchten;
- Führungs- und Orientierungslicht, z. B. in Flugzeugen oder in Gebäuden;
- leuchtende Schilder, Rettungszeichenleuchten, Verkehrs- und Werbeschilder;
- Innenbeleuchtung in Autos;
- dekorative Raumbeleuchtung;
- transparente OLEDs, verbaut in Vitrinen und unter Regalen in Museen und Verkaufsräumen;
- leuchtende Sicherheitskleidung für Rettungsdienste.

Erst in einigen Jahren werden sich dann folgende Anwendungen erschließen:



3 Effizienzentwicklung LED/OLED gegenüber etablierten Leuchtmitteln

- breiter Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung;
- diffuse Deckenbeleuchtung und andere leuchtende Architekturelemente.

Noch langfristige Visionen sind:

- bei Bedarf leuchtende Fenster, die nach Sonnenuntergang das Tageslicht ersetzen (Bild 4);
- leuchtende Külschrankinnenwände;
- leuchtende Vorhänge.

4 Flächige Lichtabstrahlung und Transparenz im ausgeschalteten Zustand werden ganz neue Anwendungen für die Lichttechnik ermöglichen. (Quelle: Osram)



4

Bis großflächige Einzelmodule für die Raumbeleuchtung aus transparenten Lichttrennwänden oder Lichthimmeln angeboten werden, vergehen voraussichtlich noch circa zehn Jahre.

Auch eine klassische Lichtdecke wird sich sicher noch einige Zeit deutlich günstiger mit LEDs als mit OLEDs verwirklichen lassen. Viele Designideen sind mit der seitlichen Einkopplung von LED-Licht in Folien realisierbar. Bei einigen der vorgestellten Anwendungen gibt es jedoch keine technische Alternative zur OLED. Zudem bietet sie bezüglich des Preises pro Lumen langfristig größeres Potential als die LED.

5 Konjunktur- und Umweltschutzaspekte

Das volkswirtschaftliche und das ökologische Potential der OLED ist enorm. OLEDs erschließen ein großes Energieeinsparpotenzial und enthalten im Allgemeinen keine umweltgefährdenden Stoffe. Vor diesem Hintergrund wird intensiv an organischen Leuchtdioden für die Allgemeinbeleuchtung geforscht. In Deutschland bündelt das Projekt »OLED für Anwendungen im Lichtmarkt« (OPAL) und inzwischen das Folgeprojekt TOPAS die Forschungsaktivitäten. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert das Projekt im Rahmen der OLED-Initiative [6]. Diese Initiative stellt 100 Mio. zur Verfügung. Im TOPAS-Projekt kooperieren Partner, die die gesamte Wertschöpfungskette von den Materialien bis zur kompletten OLED-Lampe abdecken. Deutsche Unternehmen haben zugesagt, nach erfolgreichem Abschluss des Projektes (voraussichtlich 2011) weitere 500 Mio. Forschungs- und Entwicklungsmittel bereit zu stellen. Ziel ist es, eine OLED-Fertigung in Deutschland zu etablieren. Die Europäische Union fördert die OLED-Technologie ebenso [7] wie in den USA das Department of Energy [8].

6 Aufbau und Funktion

Die organische Leuchtdiode (OLED) ist ein leuchtendes Bauelement aus mehreren dünnen Schichten organischer Halbleiter. Wesentliche Unterschiede zur anorganischen Leuchtdiode (LED) sind die kleineren Strom- und Leuchtdichten, außerdem sind keine einkristallinen Materialien erforderlich.

OLEDs können in Zukunft wahrscheinlich mit preisgünstigen Verfahren, eventuell auch durch Drucktechnik, hergestellt werden.

Allen OLED gemeinsam ist der schichtweise Aufbau zwischen den zwei Elektroden Anode und Katode (Bild 1). Mehrere dünne Schichten mit einer Gesamtdicke von wenigen 100nm sind quasi gestapelt, weshalb man auch vom OLED-Stack (engl. stack: Stapel) spricht.

Für eine transparente OLED z. B. verwendet man ein Glas-Substrat. Darauf wird eine transparente Elektrode aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) aufgebracht, danach folgen die üblicherweise amorphen organischen Schichten und anschließend eine transparente Gegenelektrode. Für 1 m² werden dabei nur circa 1 g organische Materialien benötigt.

Eine Verkapselung als Schutz gegen Oxidation, typischerweise ebenfalls mit Glas, ist für eine längere Lebensdauer erforderlich. Ohne hermetische Versiegelung der organischen Schichten, insbesondere gegen Sauerstoff und Feuchtigkeit, weisen diese eine begrenzte Lebensdauer auch nur bei reiner Lagerung ohne Betrieb auf. Auch UV-Licht und zu hohe Temperaturen lassen die organischen Schichten altern.

Die Struktur der organischen Moleküle bestimmt die Farbe des Lichts. Alle Spektralfarben lassen sich herstellen. Weißes Licht ist auf unterschiedliche Weise realisierbar: Technisch am einfachsten ist eine Mischung verschiedenfarbig emittierender organischer Materialien in einer Schicht oder die Schichtung dieser verschiedenen Materialien. So würde sich zum Beispiel das Licht aus einem rot, blau und grün emittierenden Material mischen oder ein blau-grün und ein orange emittierendes Material könnten übereinander liegen. Durch Variation der Schichtdicken lassen sich unterschiedliche Weißtöne generieren. Diese sind dann produktionsseitig festgelegt und verändern sich höchstens unbeabsichtigt durch verschieden schnelle Alterung der Materialien.

Denkbar ist wie bei den OLED-Displays auch eine Anordnung der verschiedenen Materialien nebeneinander. Dadurch können ein-

stellbar unterschiedliche Farben erzeugt werden, doch natürlich sind Lichtquellen mit lateraler Strukturierung aufwendiger und damit teurer in der Herstellung.

Als Basismaterial für die organische Schicht werden die folgenden Grundtypen verwendet:

- **SM-OLED**
Sie bestehen aus kurzen Molekülen (engl. small molecule) und wurden insbesondere von Kodak entwickelt. Diese Methode ist in der Fertigung teurer, da die kleinen Moleküle in einer Vakuumkammer aufgedampft werden. Dafür ist die OLED im Ergebnis langzeitstabiler als z. B. bei den folgenden Polymer-LEDs.
- **PLED**
Die Polymer-LEDs sind aus Entwicklungen von Cambridge Display Technology (CDT) hervorgegangen. Bei ihnen lässt sich die Leuchtschicht auf nahezu beliebig großes Basismaterial aufspritzen. Das dabei eingesetzte Verfahren ähnelt dem Tintenstrahldruck.
- **PHOLED**
In jüngster Zeit werden Farbstoffmoleküle eingesetzt, die eine vierfach höhere Effizienz als die oben beschriebenen Molekültypen erwarten lassen. Dazu werden metall-organische Komplexe verwendet. Die Lichtaussendung resultiert aus deutlich langsamer rekombinierenden Triplet-Zuständen, was Phosphoreszenz genannt wird. Durch geringe Zusätze von Iridium oder Platin wird diese nutzbar gemacht. Damit liegt die erreichbare Quanteneffizienz nahe 100% [9].

Mit metall-organischen Komplexen wurde Ende 2008 von Osram Opto Semiconductor eine große Leuchtdichte von 1000 cd/m² und Lichtausbeute von 63 lm/W für weißes Licht erreicht. Hinsichtlich Spektrum und Farbwiedergabe erfüllt es die Vorgaben des Energy-Star-Labels für Solid State Lighting. Die Universität Dresden hat bekannt gegeben, bereits OLEDs mit 90 lm/W realisiert zu haben [10].

Höhere Werte für die Lichtausbeute, wie z. B. von 210 lm/W [11] betreffen OLEDs, die farbiges Licht abstrahlen. So sind grün emittierende OLEDs deutlich effizienter herstellbar.



5 17 x 17 cm großes OLED-Muster. Während die OLED-Lichtquelle im ausgeschalteten Zustand kaum ins Auge fällt, erscheint sie im eingeschalteten Zustand als homogen leuchtende Fläche mit hoher Leuchtdichte. (Quelle: Osram)



6 Auf der Messe EuroLuce im April 2009 in Mailand präsentierte Philips diverse Leuchten-Prototypen auf OLED-Basis für den Wohnbereich. Die Konzept-Reihe »OH...LEDs!« besteht aus verschiedenen Tisch-, Steh-, Wand- und Deckenleuchten. Hier vereinen sich sanft-diffus leuchtende OLED-Flächen und LEDs für funktionales, gerichtetes Licht. (Quelle: Philips)

Bei den Leuchtdichten werden derzeit Werte von 1000 bis 1500 cd/m² erzielt. Das entspricht etwa der zehnfachen Helligkeit eines weißen Papiers bei typischer Bürobeleuchtung von 500 lx. Für Rettungszeichen- und andere Hinweisleuchten benötigt man einige 100 cd/m². Für die Allgemeinbeleuchtung sind circa 1000 bis 2000 cd/m² gefragt.

Die Vielfalt der Abkürzungen für OLED-Bauformen ist beachtlich: FOLED (Flexible OLED), WOLED (White OLED), TOLED (Topemitting OLED oder Transparent OLED), SOLED (Stacked OLED), und viele mehr.

7 Ausblick

Folgende wesentliche Herausforderungen müssen noch gelöst werden, um den OLED den Eintritt in den Massenmarkt in der Allgemeinbeleuchtung zu eröffnen:

- Die Lebensdauer, insbesondere der blauen Komponente, aber auch die Konstanz der Farbqualität und die allgemeine Zuverlässigkeit müssen verbessert werden.
- Kosteneffiziente Produktionstechniken müssen entwickelt werden, um wenigstens eine Größenordnung günstiger als OLED-Displays zu werden und in die Nähe heutiger Lichtquellen zu kommen.



7 Die heute für Beleuchtung brauchbaren OLED-Einzelflächen messen knapp über 10 cm x 10 cm. Mit den hier gezeigten Modulen baute Ingo Maurer im April 2008 eine der ersten OLED-Leuchten. (Quelle: Osram)

- Die Fertigungstechniken müssen zukünftig die besonderen Eigenschaften der OLED – dünn, transparent und flexibel – erhalten. Dazu sind insbesondere flexible aber sauerstoffdichte Substrate und Verkapselungen erforderlich.

Angesichts dieser Aufgaben ist es verständlich, dass viele Förderprogramme und Entwicklungsanstrengungen die Fertigungsverfahren betreffen. Denn nur, wenn großflächige und homogene OLED-Lichtquellen mit großer Zuverlässigkeit angeboten werden können, wird die OLED bedeutsame Marktanteile erobern.

8 Literatur

- [1] A. Bernanose et al., J. Chim. Phys., Vol. 50, S. 65 (1953)
- [2] A. Bernanose: Electroluminescence of organic compounds, British Journal of Applied Physics, Vol. 6, Supplement 4, S. 54–55 (1955), <http://dx.doi.org/10.1088/0508-3443/6/S4/319>
- [3] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/chemadv.pdf
- [4] C. W. Tang and S. A. VanSlyke: Organic electroluminescent diodes, Applied Physics Letters Vol. 51, S. 913 (1987), <http://dx.doi.org/10.1063/1.98799>
- [5] J. H. Burroughes, et al.: Light-emitting diodes based on conjugated polymers, Nature, Vol. 347, S. 539–541 (1990), <http://dx.doi.org/10.1038/347539a0>
- [6] <http://www.bmbf.de/foerderungen/12941.php>
- [7] <http://www.comboled-project.eu>
<http://www.olla-project.org>
<http://www.oled100.eu>
- [8] http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/organic/current_organic.html
http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/organic/monomer_excimer.html
- [9] Nowy et al., Proc. SPIE, Vol. 6999, 69992V (2008), doi:10.1117/12.780525
- [10] Sebastian Reineke, Frank Lindner et al.: White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency, Nature 459, 234–238 (2009), doi:10.1038/nature08003
- [11] http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090403/168292

Elektrisch leitende Kunststoffe

- OLED-Kunststoffe leiten selbst Strom, d.h. sie benötigen keine Zusätze aus leitenden Partikeln wie Aluminium oder Ruß. Letzterer wird z. B. bei schwarzen ESD-Kunststoffen eingesetzt.
- Die Leitfähigkeit beruht auf überlappenden Doppelbindungen innerhalb einer Polymerkette und möglichst langen Polymerketten. Der Ladungstransport erfolgt unter dem Einfluss des externen elektrischen Feldes durch ein eine Art Springen der Elektronen und Löcher entlang der Polymerketten. Der Großteil des Widerstandes entsteht beim Übergang zwischen den Polymerketten.
- Als Ladungsträger dienen Defektelektronen, die bei den meisten leitenden Kunststoffen durch Oxidation eingebracht werden. Dies nennt man analog zur klassischen Dotierung anorganischer Halbleiter »p-Dotierung«. Die Oxidation erzeugt aber eine um Größenordnungen höhere Defektdichte. Die positiven Ladungen des Polymergerüsts werden durch die Einlagerung von Anionen eines so genannten Leitsalzes kompensiert.
- Die elektrische Leitfähigkeit selbstleitender Polymere liegt im Bereich von 10⁻¹⁵ bis 10 Sm⁻¹. Zum Vergleich: Teflon und Quarz haben eine Leitfähigkeit von 10⁻¹⁶ Sm⁻¹, Silizium 10⁻³ Sm⁻¹ und Silber und Kupfer von 10⁸ Sm⁻¹. Die Polymere decken also den Bereich von Isolatoren über Halbleiter bis knapp an metallische Leiter ab.
- Neben OLED wird auch an der Herstellung von Polymerelektronik, d. h. elektronischen Schaltungen aus leitfähigen Polymeren geforscht. Denkbar sind biegsame Leiterbahnen und Transistoren.
- Außerdem werden elektrisch leitende Polymere für viele Anwendungszwecke weiter entwickelt. Sie kommen zum Einsatz als Korrosionshemmer, kompakte Widerstände, elektromagnetische Abschirmung und für schaltbare Verglasungen.