

Nanobasierte Beleuchtungssysteme : Organische Licht emittierende Diode (OLED)

1 Beschreibung der Anwendung

1.1 Produkte und Zweck des Einsatzes von Nanomaterialien¹

Künstliche Beleuchtung durch elektrische Lichtquellen spielt eine herausragende Rolle in unserem Alltag, sowohl bei der Innen- als auch Außenbeleuchtung. Sie kann auf Straßen, in der Wohnung und am Arbeitsplatz für erhöhte Sicherheit, Komfort und Leistung sorgen. Für Beleuchtung werden laut der Internationalen Energieagentur weltweit rund 20 Prozent der leitungsgebundenen Elektrizität verbraucht. In Deutschland werden 15 Prozent des verbrauchten Stromes für Beleuchtung eingesetzt. Den größten Anteil am Stromverbrauch hat die Beleuchtung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung (UBA 2009). Der Bedarf nach künstlichen Lichtquellen steigt weiterhin, was die Entwicklung energiesparender Beleuchtung besonders wichtig macht.

Das Potenzial der Beleuchtung für die Ressourceneinsparung und den Klimaschutz ist groß. Hoffnungsträger sind hierbei die so genannten Festkörperstrahler. Durch diese kann sich die Energieeffizienz der Beleuchtung drastisch erhöhen. Die Entwicklung neuartiger, auf Nanotechnik basierender Beleuchtungstechniken umfasst neben organischen Leuchtdioden (OLED) auch OLED kombiniert mit Quantenpunkten, Quantenpunkt-ALED² oder Silizium-basierte ALED (SiLED). Welche dieser Beleuchtungstechniken in der Zukunft eine wesentliche Rolle spielen und vor allem welche Auswirkungen auf die Umwelt sie haben werden, ist derzeit noch nicht abzusehen.

Das vorliegende Datenblatt konzentriert sich auf die Anwendungen von OLED zur Beleuchtung. Deren Funktion basiert auf nanostrukturierten organischen Halbleitermaterialien. Diese neuartige Beleuchtungstechnik wird nach Expertenmeinung in den kommenden Jahren sowohl die Innen- und Außenbeleuchtung als auch den Displaybereich (Fernsehen, Monitor, Telefon) revolutionieren und teilweise bisherige Systeme ersetzen.

¹ In der Nanotechnik werden technisch erzeugte Nanomaterialien genutzt. Nanomaterialien bestehen aus abgrenzbaren strukturellen Bestandteilen in einer Größenordnung von 1-100 Nanometern ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) in mindestens einer Dimension (siehe auch die Empfehlung der Kommission vom 18.10.2011 zur Definition von Nanomaterialien (2011/696/EU)). Nanopartikel sind eine Teilmenge der Nanomaterialien und weisen in allen drei Dimensionen o.g. Größenordnung auf. In der Umwelt kommen sowohl natürliche als auch anthropogene Nanomaterialien vor.

² ALED: Anorganische Licht emittierende Diode

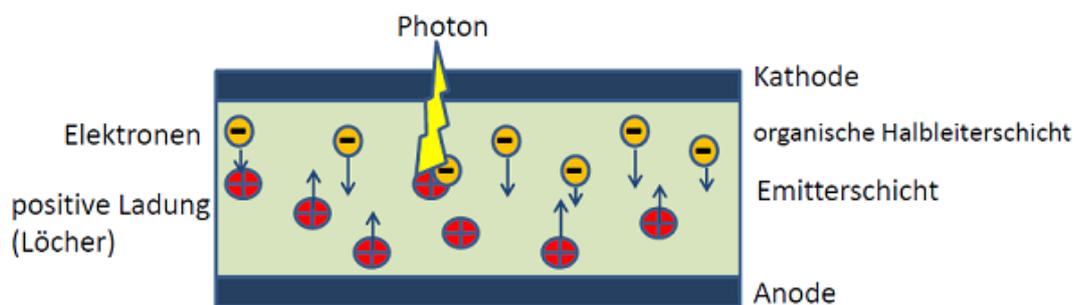
OLEDs sind Flächenlichtquellen³ und bieten im Bereich der Beleuchtung neue Gestaltungsmöglichkeiten wie großflächige Raumbeleuchtung, flexible leuchtende Folien, biegsame Bildschirme oder transparente Lichtquellen (BMBF 2012). Sie eignen sich vor allem für Bildschirme (z. B. Fernseher, PC-Bildschirme, Monitore) und Displays (z.B. in Mobiltelefonen und Digitalkameras). Als solche sind sie bereits auf dem Markt verbreitet. Im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken haben sie den Vorteil, dass das organische Halbleitermaterial gleichzeitig Bildgeber und Lichtquelle und damit energieeffizienter sowie hochauflösend ist. Das Licht von OLED-Beleuchtungen hat weder Infrarot- noch UV-Anteile. Damit können sie besonders für empfindliche Bereiche wie im Museum geeignet sein. Produkte zur Beleuchtung, in denen OLEDs verarbeitet werden, gibt es seit 2010 auf dem Markt. OLED-Beleuchtungssysteme könnten innerhalb der nächsten Jahre und Dekaden traditionelle Systeme teilweise ersetzen und vollkommen neue Anwendungen erschließen.

Allerdings ist es noch zu früh, um Aussagen über die Marktentwicklung von OLEDs für die Beleuchtung zu treffen, weil es derzeit noch relativ wenige OLED-Beleuchtungsprodukte auf dem Markt gibt und sie zudem teuer sind und für sehr unterschiedliche Anwendungsgebiete angeboten werden. Mit zunehmender Reife der OLED-Technik wird das Produktionsvolumen steigen und werden die Kosten für OLED-Panels und -Leuchten deutlich sinken (US DOE 2011).

1.2 Funktion und Aufbau der OLED und enthaltene Nanomaterialien

Die OLED ist ein dünnflächiges, üblicherweise unter 1 Mikrometer (μm^4) dickes, leuchtendes Bauelement. Sie besteht aus mindestens einer lichtemittierenden Schicht (Emitterschicht) aus organischem Halbleitermaterial, ist in der Regel aus mehreren Schichten von jeweils bis zu 100 Nanometer (nm^5) Dicke aufgebaut, die zwischen zwei Elektroden liegen (siehe Abbildung 1). Entweder sind eine oder beide Elektroden der OLED transparent, so dass das Licht in eine oder beide Richtungen strahlen kann und durchsichtig erscheint, wenn sie ausgeschaltet ist. Die OLED bietet gegenüber der ALED den Vorteil, dass die Farbe des Lichts über das gesamte sichtbare Spektrum maßgeschneidert eingestellt werden kann.

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer OLED



³ Die Lichtquelle ist eine homogen leuchtende Fläche. OLEDs bestehen aus mehreren halbleitenden organischen Schichten (Abbildung 1) und geben das Licht über die Fläche dieser Schichten ab.

⁴ $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$ (Millimeter)

⁵ $1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m}$

Angeschaltet baut sich zwischen den Elektroden eine Spannung auf, die dazu führt, dass positive Ladung (Löcher) und negative Ladung (Elektronen) in den Halbleiterschichten aufeinander zudriften. Die Ladungen akkumulieren in der Emitterschicht und bilden beim Aufeinandertreffen einen angeregten Zustand: das Exziton. Abhängig vom Mechanismus kann dies die direkte Anregung eines Farbstoffmoleküles sein; oder die Anregung des Farbstoffmoleküles erfolgt durch die beim Zerfall des Exzitons freiwerdende Energie. Wenn der angeregte Zustand des Farbstoffes wieder in den Grundzustand übergeht, wird ein Lichtteilchen (Photon) mit einer bestimmten Wellenlänge ausgesendet. Es lassen sich zwei Arten von OLED unterscheiden: Die Emitterschicht besteht aus Polymeren (PLED) oder aus kleinen organischen Molekülen (small molecule organic LED = SMOLED).

Tabelle 1: Für OLED-Leuchtmittel verwendete Materialien (in Anlehnung an Spengler et al.)

Bestandteil	Material
Organischer Halbleiter/Emitterschicht	Polymere (z.B. Poly-p-Phenylen-Vinylen, PPV) oder Moleküle (Lichtemission); Triarylamine, Triphenylenderivate, Kupferphthalocyanin (Lochleiter); Tris(8-Oxychinolinato)Aluminiumkomplex (Elektronenleiter); z.T. enthalten: Seltene Erden (z.B. Europium), Edelmetalle (Platin, Iridium)
Kathode	Metall, z.B.: Aluminium, Barium, Magnesium, Kalzium, Ruthenium, Silber-Legierungen, Lithiumfluorid
Anode	transparente leitende Oxide (TCO), v.a. Indium-Zinn-Oxid (ITO); Alternativen: dotierte Zinkoxide, Silber-Nanodraht
Weitere Schichten wie Elektroneninjectionsschicht, Lochleitungsschicht	Lithiumfluorid, Cäsiumfluorid oder Silber; PEDOT/PSS (Poly(3,4-Ethylendioxythiophen)/ Polystyrolsulfonat, Kupferphthalocyanin
Trägermaterial/Abdeckung	Silizium, Glas (z.B. Borsilikatglas oder normales Kalk-Natron-Glas), Polymerfolie, Metallfolie (Aluminium, Edelstahl), flexibles Plastik
Gehäuse/Fassung/Rahmen	Keine genaueren Informationen / viele Möglichkeiten
Elektronische Komponenten	Keine genaueren Informationen

1.3 Relevante physikalisch-chemische Eigenschaften der OLED

Tabelle 2: Lichttechnische Größen

<p>Lichtstrom (Lumen, lm): Lichtquellen geben Strahlung in einem bestimmten Spektrum ab. Die Strahlungsleistung mit der Einheit Watt erfasst diese abgegebene Strahlung unterschiedslos über das gesamte Lichtspektrum. Die Empfindlichkeit des Auges ist aber für die einzelnen Wellenlängen unterschiedlich. Berücksichtigt man diesen Einfluss, führt dies zu dem Lichtstrom, auch Lichtleistung genannt, mit der Einheit Lumen (lm).</p> <p>Lichtstärke (Candela, cd): Lichtstrom in einem bestimmten Raumwinkel. Die Lichtstärke bewertet das Licht, das eine Lichtquelle in eine bestimmte Richtung abstrahlt.</p> <p>Beleuchtungsstärke E (lux, lx oder lm/m^2): Lichtstrom, der auf eine bestimmte Fläche fällt.</p> <p>Leuchtdichte (candela pro m^2, cd/m^2): Lichtstrom, den eine Fläche in eine bestimmte Richtung abgibt. Die Leuchtdichte ist das Maß für das, was das menschliche Auge als Helligkeit einer Fläche wahrnimmt.</p> <p>Lichtausbeute (Lampenwirkungsgrad, Lumen pro Watt): Effizienz einer Lichtquelle, also das Verhältnis zwischen Nutzen (abgegebener Lichtstrom) und Aufwand (aufgenommene</p>
--

Elektroleistung). Die Lichtausbeute beschreibt, wie viel Licht mit der eingesetzten Elektrizität erzeugt werden kann (Maximierungsprinzip). Im Allgemeinen ist es aber das Ziel, bei einem gegebenen Lichtstrombedarf die erforderliche Elektrizität möglichst gering zu halten (Minimierungsprinzip). Daher sind andere Kennwerte, wie z.B. die PLI-Zahl, vorzuziehen.

Farbe

Die Farbe des von OLED ausgesendeten Lichts hängt von den eingesetzten Farbstoffmolekülen ab. Durch Stapelung mehrerer in unterschiedlichen Farben emittierender Schichten ist grundsätzlich jede Farbe einschließlich Weiß möglich. Das Stapeln ist möglich, da die organischen Schichten im sichtbaren Spektralbereich fast transparent sind.

Lebensdauer

Bei LED – ALED sowie OLED – wird als Lebensdauer üblicherweise die Zeit angegeben, nach der der Lichtstrom noch einen bestimmten Anteil des Anfangswertes hat⁶. Die OLEDs altern in Abhängigkeit ihrer Farbe unterschiedlich schnell⁷. Hierdurch kann es bei gemeinsamer Nutzung verschiedener OLEDs, wie bei Bildschirmen, im Laufe der Zeit zu Farbverschiebungen kommen, die nur begrenzt durch eine Nachregelung ausgeglichen werden können. Die Lebensdauer der Produkte, in denen OLEDs angewendet werden, ist mit 5.000-15.000 Stunden deutlich kürzer als der einzelnen OLEDs. 100.000 Stunden für Produkte gelten jedoch als möglich. So erbrachte das EU-Projekt OLLA⁸ für OLEDs mit 50,7 lm/W bei 1000 cd/m² bereits eine Lebensdauer von über 10.000 Stunden (OLLA 2009). Das Nachfolgeprojekt OLED100⁹ strebt einen Wert von mehr als 100.000 Stunden an.

Die Lebensdauer hängt von verschiedenen Umweltfaktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoff ab. Gut gekühlt hält die OLED mit geringer Anfangsleuchtstärke immer länger als eine OLED, die ohne Kühlung von Anfang an mit der maximalen Leuchtstärke betrieben wird. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen, wie Feuchtigkeit und Sauerstoff muss das OLED-Bauelement verkapselt sein. Das erschwert eine kommerzielle Anwendung auf einem flexiblen

⁶ Der Komplettausfall einzelner Lampen oder Module wird meist nicht berücksichtigt. Bei anderen Lampen wird die Lebensdauer anders ermittelt: Bei Glüh- und Kompaktleuchtstofflampen für den Hausgebrauch ist sie im Allgemeinen die Zeit, nach der noch 50 v.H. der Lampen funktionsfähig sind, wobei der Rückgang des Lichtstromes keine Rolle spielt (sog. mittlere Lebensdauer). Bei Lampen, die im Gewerbe eingesetzt werden, ist die Lebensdauer oft eine Zeit, nach der der Lichtstrom noch einen bestimmten Anteil seines Anfangswertes hat und nach der ein bestimmter Anteil an Lampen noch funktionsfähig ist (sog. Nutzlebensdauer). Lebensdauerangaben von LED können damit mit denen anderer Lampen nur schwer verglichen werden. Zudem ist die Aussagekraft der bei LED-Lampen meist sehr hohen Werte kritisch zu sehen. Ein Rückgang des Lichtstromes auf 50 v.H. seines Anfangswertes – die Lampe leuchtet also nur noch halb so hell wie anfangs – dürfte für die meisten Anwendungsfälle nicht akzeptabel sein.

⁷ Für weiße Lichtquellen und Monitore ist für die nutzbare Lebensdauer die der blauen Komponente begrenzend. So werden (Stand 2011) für weiße Lichtquellen 5.000 Stunden (bei 1000 cd/m²) und 12.000 Stunden (bei 100 cd/m²) angegeben. Im Vergleich dazu haben herkömmliche Glühlampen eine Lebensdauer von ca. 1.000 Stunden und Kompaktleuchtstofflampen 3.000 bis 15.000 Stunden.

⁸ OLLA = High brightness Organic Light Emitting Diodes for ICT & Lighting Applications

⁹ OLED100.EU: Organic LED lighting in European dimensions. Das Projekt wurde im 7. Forschungsrahmenprogramm von 2009 bis 2011 mit knapp 20 Mio. Euro gefördert.

Material gegenwärtig noch, da viele flexible Kunststoffsubstrate Sauerstoff und Wasser aus der Luft zu leicht durchlassen.

Lichtausbeute/Energieeffizienz

Die Stromeffizienz von Beleuchtungstechniken wird in der Öffentlichkeit vielfach diskutiert. Meldungen in den Medien über neue „Rekorde“ bei der Lichtausbeute von LED, vor allem ALED, werden interessiert aufgenommen. Es wäre unangemessen, von OLED unter Laborbedingungen gezeigte Leistungen mit der Alltagsleistung herkömmlicher Lampen zu vergleichen. Die LED-Technik, vor allem die der OLED, befindet sich noch auf dem Weg „vom Labor in die Alltagstauglichkeit“. Die Möglichkeiten der LED-Technik sind jedoch vielversprechend und bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Derzeit gibt es allerdings nur wenige OLED-Produkte und vor allem auch nur wenige Erfahrungen mit ihrem Einsatz. Belastbare Aussagen über die Stromeffizienz dieser Technik im Alltag sind somit derzeit noch nicht möglich.

2 Umwelt- und Gesundheitsaspekte

2.1 Umweltaspekte der OLEDs

Organische Leuchtdioden aus halbleitenden Materialien sind Flächenstrahler. Die derzeitigen Angaben der erreichbaren Energieeffizienz von OLEDs liegen im Bereich der anorganischen LED (ALED). Dabei handelt es sich jedoch meist um Laborwerte, die die auf dem Markt verfügbaren Produkte noch nicht erreichen. Bisher stehen aussagekräftige ökobilanzielle Untersuchungen, die den Rohstoff- und Energieverbrauch sowie das Treibhausgaspotenzial über den gesamten Lebensweg von OLEDs quantitativ betrachten, nicht zur Verfügung. Dabei würden nicht allein die Vorteile in der Nutzungsphase berücksichtigt, sondern auch der Energieverbrauch bei der Herstellung, z.B. durch die erforderlichen energieintensiven Vakuumkammern und die Freisetzung der organischen Materialien beim Aufdampfen, wenn nur ein Teil auf die OLED abgelagert wird. Im Unterschied zu herkömmlichen Flüssigkristall-Anzeigefeldern (LCD) benötigen solche mit OLED keine Hintergrundbeleuchtung. Dadurch verbrauchen sie weniger Energie, entwickeln also weniger Abwärme und sind dünner, leichter und mit geringerem Materialeinsatz herzustellen. Eine Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass bei der Herstellung und Anwendung von OLED-Anzeigen Energieeinsatz und damit auch CO₂-Ausstoß verringert werden (Steinfeldt et al. 2004).

In den OLEDs werden nur sehr geringe spezifische Mengen einer Vielzahl an Materialien eingebaut, darunter Verbindungen seltener Erden wie Lanthan, Cer und Yttrium, Edelmetalle wie Silber, sonstige (Halb-)Metalle wie Indium, Magnesium und Aluminium und Hochleistungskunststoffe. Diese Metalle gehen – wie bei ihrem Einsatz in vielen anderen elektronischen Anwendungen auch – im Lebensweg der OLEDs unausweichlich dissipativ verloren.

In den transparenten Anoden wird in der Regel Indium-Zinn-Oxid (ITO) eingesetzt, in der Emitterschicht werden verbreitet Edelmetalle wie Platin oder Iridium verwendet. Diese Metalle gelten unter Versorgungsaspekten als kritische Rohstoffe (Erdmann and Graedel 2011). Hinzu kommen ein extrem hoher spezifischer Energieaufwand bei der Primärgewinnung und Verhüttung sowie die Emission von Schadstoffen (z.B. Schwermetalle). Nach Alternativen für diese Metalle wird gesucht. Beispielsweise wird daran geforscht, rein organische Emmitter herzustellen (Schlaak 2012). Doch wie immer gehen aussichtsreiche Substitutionslösungen mit

neuen umwelt- oder versorgungsrelevanten Problemen einher. Die Entwicklung alternativer Materialien – insbesondere zur Substitution von ITO – ist nach Ansicht von Experten von zentraler Bedeutung für die Realisierung einer bezahlbaren OLED-Beleuchtung (USDOE 2011, Spengler et al.), wobei derzeit weniger die Indiumgehalte preisbestimmend sind¹⁰, sondern die aufwändigen ITO-Sputter-Produktionsverfahren¹¹.

Ein negativer Aspekt beim Einsatz von OLEDs ist, dass aufgrund der sehr geringen Einsatzkonzentrationen der Technikmetalle ein dissipativer, d.h. ein unwiederbringlicher, Verlust durch Feinverteilung in Glas oder Kunststoffen zu erwarten ist. Selbst wenn durch Rücknahme- und Recyclingsysteme größere Mengen an OLEDs als Abfall gesammelt würden, wäre eine Rückgewinnung und eine erforderliche Anreicherung technisch eher unwahrscheinlich. So hat eine Studie, die die Recyclingfähigkeit flexibler Kunststoff-OLEDs untersucht, gezeigt, dass lediglich 0,07 bis 3 Prozent der eingesetzten Metalle zurückgewonnen werden konnte (Barruetabena et al. 2011).

Es wird erwartet, dass die OLED in Zukunft ein Massenprodukt wird und eine große Menge an OLEDs in den Abfall gelangt: Eine Schätzung geht weltweit allein von 10.000 Tonnen flexiblen OLEDs im Jahr 2022 aus (Colegrove 2009). Daher wäre es wünschenswert, nicht nur eine Untersuchung der Behandlung verbrauchter OLEDs und ihres Recyclings, sondern auch ein Stoffstrommanagement vorzusehen, um eine sachgerechte Erfassung und Aufbereitung zu gewährleisten.

2.2 Ökotoxizität der in OLEDs enthaltenen Materialien

Die in OLEDs eingesetzten Materialien sind keine Nanomaterialien im Sinne der Definition der EU-Kommission, sondern nanodünne Schichten. Daher bezieht sich die Beurteilung möglicher ökotoxikologischer Effekte nicht auf die nanospezifischen Wirkungen, sondern auf die eingesetzten Stoffe im Allgemeinen.

Je nach Herstellungsmethode können die Bestandteile der einzelnen Schichten variieren, so dass eine Bewertung möglicher (öko-)toxikologischer Effekte nicht pauschal, sondern nur in Betrachtung der einzelnen Komponenten der OLEDs erfolgen kann. Im Folgenden werden exemplarisch für einige eingesetzte Stoffe die vorliegenden ökotoxikologischen Erkenntnisse dargestellt. Besonders in den verschiedenen organischen Halbleitern und in den Anoden kommen jedoch auch Materialien vor, deren (öko-)toxikologisches Potenzial bislang nicht hinreichend untersucht ist.

In den organischen Halbleitern werden leitfähige Polymere eingesetzt, wie Derivate des Poly(p-Phenylen-Vinyl) (PPV). Die Polymere gelten wie andere Kunststoffe auch als ökotoxikologisch unkritisch, da sie relativ inert sind. Über das Gefährdungspotenzial von ggf. eingesetzten Zusatzstoffen liegen keine Befunde vor.

Je nach Zusammensetzung wird zum Beispiel für die Emitterschicht das für die Farbgebung verantwortliche Aluminium-tris(8-Hydroxychinolin) (Alq3) eingesetzt. Daten zur Ökotoxikologie, als auch zur Persistenz, Abbaubarkeit und Mobilität in der Umwelt oder zum Potenzial, in

¹⁰ Der Modulpreis eines ITO-Elements wird nur zu wenigen Prozent durch die enthaltenen Indiumfrachten bestimmt.

¹¹ Das Sputtern ist ein spezielles Beschichtungsverfahren mit meist leitfähigen Materialien.

Umweltorganismen zu akkumulieren, sind unzureichend für Alq3. Alq3 gilt als nicht brennbarer Stoff.

Für Kupferphthalocyanin (Pigment Blau), häufig verwendet in der Lochleitungsschicht, liegen Daten vor, die auf eine Persistenz in der Umwelt hinweisen. Der Stoff ist nicht bioakkumulierend und es bestehen keine Hinweise auf eine ökotoxische Wirkung (Registrierungsdaten nach REACH-EU-Chemikalienverordnung).

In der Anode werden transparent leitende Oxide wie Indium-Zinn-Oxid (ITO) eingesetzt. Während Daten zur Toxikologie vorliegen, sind Effekte auf Umweltorganismen nicht bekannt. Aufgrund der zu erwartenden steigenden Anwendung bei der Herstellung transparenter Elektroden muss auch mit einem vermehrten Eintrag in die Umwelt gerechnet werden. Es sollten daher Daten zur Ökotoxikologie generiert werden. Da Indium nur begrenzt verfügbar und sehr teuer ist, wird derzeit intensiv an weniger kostenintensiven transparenten und leitfähigen Beschichtungen gearbeitet. Als kostengünstigere Alternativen zum ITO werden derzeit dotierte Zinkoxide und Silbernanodrähte erforscht. Sowohl Zinkoxid als auch Silber zeigen bereits bei geringen Umweltkonzentrationen Wirkungen auf aquatische Organismen. Sie werden als wassergefährdende Stoffe der Klasse 2 bzw. 3 eingestuft.

Eine Freisetzung der in OLEDs eingesetzten gefährlichen Stoffe dürfte bei der Anwendung allerdings eher unwahrscheinlich sein, da sie zum Schutz vor Feuchtigkeit und Sauerstoff verkapselt sind. So ist eine Freiwerdung und Exposition der Umweltkompartimente in der Gebrauchsphase praktisch ausgeschlossen.

OLED-basierende Beleuchtungssysteme und Displayanwendungen sind getrennt vom Siedlungsabfall zu erfassen (siehe ElektroG¹²). Das ElektroG enthält jedoch keine Vorschriften zur selektiven Behandlung von nanostrukturierten Materialien, so dass diese bei der Behandlung freigesetzt werden könnten. Bei einer unsachgemäßen Entsorgung über den Restmüll, würden OLEDs in Abfallverbrennungsanlagen mit hocheffizienter Abgasreinigung verbrannt werden. Bei einer Entsorgung von OLEDs außerhalb des vorgesehenen Entsorgungspfades nach ElektroG oder im Restmüllpfad könnte eine Umweltexposition durch Alterungs- und Verwitterungsvorgänge bestehen.

Eine umfassende Bewertung der Risiken von OLEDs für die Umwelt ist derzeit nicht möglich, da Informationen zu einzelnen eingesetzten Materialien fehlen.

2.3 Gesundheitsaspekte

OLEDs enthalten Stoffe, die gesundheitlich bedenklich sind (z.B. Triphenylene). Bei bestimmungsgemäßem Gebrauch der Lichtquellen werden die in den OLEDs verwendeten chemischen Stoffe nicht freigesetzt, da OLEDs zum Schutz vor äußeren Einflüssen verkapselt sind. Ob die eingesetzten Stoffe nach Bruch in die Umwelt gelangen und dadurch möglicherweise eine Gesundheitsgefährdung verursachen können, bleibt zu prüfen. Tatsache ist jedoch, dass die im Leuchtkörper eingesetzten Mengen extrem gering sind. Letztlich sind die Hersteller in der Pflicht, vor der Markteinführung eine Bewertung vorzunehmen.

¹² Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG)

Die biologische („visuelle“ und „nichtvisuelle“) Wirkung der realisierten Beleuchtungssituation hängt von den Eigenschaften des verwendeten Leuchtmittels bezüglich Spektrum, Bestrahlungsstärke, Strahldichte, räumlicher Strahlungsverteilung (Geometrie) und zeitlicher Änderung während der Exposition ab und wird von den individuellen Gegebenheiten und Prozessen bestimmt.

Im Unterschied zu Fluoreszenzlampen geben OLEDs weder Infrarot- noch ultraviolette (UV) Strahlung ab. Potenzielle Gesundheitsrisiken durch UV-Strahlung sind damit nicht gegeben, sofern diese Feststellung auf alle Typen von Weißlicht-OLEDs zutrifft. Eine Einschätzung der Strahlenschutzkommission auf Grundlage von vergleichbaren Messungen kommt zum selben Ergebnis (SSK 2010). Die gegenwärtig verfügbaren Weißlicht-OLEDs weisen lediglich vernachlässigbar kleine Emissionen infraroter (IR) Strahlung auf, so dass thermische Schadwirkungen nur bei Leuchtdichten möglich sind, die die Schwelle zur Blendung erheblich übersteigen. Dennoch empfehlen wir, in die Normen die Forderung zur Begrenzung des relativen Beitrages infraroter Strahlung im Spektrum von Weißlicht-OLEDs aufzunehmen.

Wissenschaftler empfehlen, Langzeitrisiken wie auch die Effekte infolge zu kurz kommender oder gestörter Regenerations- und Reparaturprozesse für Personen unterschiedlichen Alters zu untersuchen und in Risikoschätzungen einzubeziehen (Spengler et al.).

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bisher sind OLEDs, im Gegensatz zu ALEDs, nicht von EU-Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Produkten oder zur Energieverbrauchskennzeichnung erfasst¹³. Daher bestehen bislang auch keine Anforderungen zur Produktinformation. Zukünftig sollte jedoch eine Aufnahme in den Anwendungsbereich der entsprechenden Verordnungen, die Leuchtmittel betreffen, erfolgen.

OLEDs müssen die Vorgaben der Ersten Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz¹⁴ einhalten, die Bestimmungen zur Beschaffenheit elektrischer Geräte enthält.

¹³ Die Definitionen in Verordnungen Nr. 244/2009/EU (Verordnung (EG) Nr. 244/2009 der Kommission vom 18. März 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht) und Nr. 1194/2012/EU (Verordnung (EU) Nr. 1194/2012 der Kommission vom 12. Dezember 2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates im Hinblick auf die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lampen mit gebündeltem Licht, LED-Lampen und dazugehörigen Geräten) sowie 874/2012/EU (Delegierte Verordnung (EU) Nr. 874/2012 der Kommission vom 12. Juli 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von elektrischen Lampen und Leuchten) stellen auf ALED ab. Alle drei Verordnungen stellen Anforderungen zur Produktinformation. Sie unterscheiden sich in den betroffenen Lampentypen und dem Inhalt der geforderten Information.

¹⁴ 1. ProdSV – Verordnung über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

Geräte mit OLEDs werden als Elektrogeräte im Sinne der Richtlinien 2002/96/EG bzw. 2012/19/EU (WEEE¹⁵) sowie der Richtlinien 2002/95/EG bzw. 2011/65/EU (RoHS¹⁶) angesehen. Hersteller von OLED-Geräten sind somit zur Einhaltung der Stoffverbote nach ElektroStoffV¹⁷ sowie zur Registrierung, Abgabe von Mengenmeldungen und Altgeräte-Entsorgung nach ElektroG¹⁸ verpflichtet. Aufgrund der Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten von OLEDs können sie jedoch aus dem Anwendungsbereich des aktuellen ElektroG ausgenommen sein; denkbar wäre dies beispielsweise bei einer Verbindung mit Textilien (insbesondere Kleidung). Entsprechend der aktuell (seit 1. Februar 2013) geltenden Definitionen für Lampen und Leuchten¹⁹ sind OLED-Geräte zur Beleuchtung allerdings regelmäßig als Lampen und nicht als Leuchten anzusehen. Spätestens ab 2018 sehen WEEE-Richtlinie und ElektroG einen offenen Anwendungsbereich vor, der sämtliche OLED-Geräte unabhängig von Kategorien erfassen soll.

Das Elektroggesetz schreibt vor, dass OLED-basierende Beleuchtungssysteme und Displayanwendungen getrennt vom Siedlungsabfall zu erfassen sind (§ 9 Absatz 1 ElektroG). Die WEEE-Richtlinie führt in ihren Erwägungsgründen (EWG 18) aus, dass es in der Abfallphase und während des Recyclings zu einer Exposition gegenüber Nanomaterialien kommen kann. Um mögliche Risiken der Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten, die Nanomaterialien enthalten, für die menschliche Gesundheit und die Umwelt einzudämmen, wird die Kommission aufgefordert, die Erfordernis einer speziellen Behandlung zu prüfen (Artikel 8(4)).

Die für die Herstellung von OLEDs innerhalb der EU eingesetzten Stoffe unterliegen den Vorgaben der REACH-VO (EG) Nr. 1907/2006²⁰. Soweit OLEDs in die EU importiert werden, greifen nur die vergleichsweise geringen REACH-Pflichten für Erzeugnisse.

4 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Hinsichtlich des Umweltverhaltens der in OLEDs enthaltenen Materialien, ihren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sowie der Umweltverträglichkeit von OLEDs besteht folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

¹⁵ WEEE-Richtlinie: Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. Januar 2003 und Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE: Waste of Electrical and Electronic Equipment)

¹⁶ RoHS-Richtlinie: Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. Januar 2003 und Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS: Restriction of Hazardous Substances)

¹⁷ Verordnung zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung (ElektroStoffV))

¹⁸ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG)

¹⁹ siehe hierzu <http://www.stiftung-ear.de>

²⁰ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH)

- Prüfung der Bedeutung des Ressourcenverbrauchs an seltenen Rohstoffen;
- Untersuchung des Verhaltens der in OLEDs enthaltenden Stoffe bei der Entsorgung ;
- Prüfung der Recyclingmöglichkeiten zur Rückgewinnung der spezifischen Technikmetallfrachten aus OLEDs. Hierbei sind auch potenzielle Synergien bei der Erfassung und Entsorgung von ähnlich funktionalisierten Produktgruppen wie organische und Dünnschicht-Photovoltaik-Module oder elektrochrome Gläser zu untersuchen. Die Auswirkungen auf die Sammlung und Entsorgung nach ElektroG sind zu überprüfen;
- Steigerung der Energieeffizienz und der Lebensdauer von OLEDs durch Optimierung der Beleuchtungstechnik.

5 Fazit

Das Umweltbundesamt hält OLEDs für eine interessante Zukunftsentwicklung im Beleuchtungssektor. Im Vergleich mit den herkömmlichen Glühlampen ist der Energiebedarf um eine bestimmte Lichtausbeute zu erzeugen geringer, gleichzeitig ist die Lebensdauer deutlich höher als die der Glühlampe.

Im Unterschied zu den verbreiteten Energiesparlampen benötigen OLEDs kein Quecksilber, das beim Zerschlagen frei gesetzt werden könnte. Die enthaltenen Mengen an gefährlichen Stoffen sind aufgrund der Nanobeschichtung außerordentlich gering und lassen somit auch beim Zerschlagen keine gesundheitliche Gefahr erwarten. Die Technik (Beschichtung) lässt auch eine Freisetzung von Nanopartikeln nicht erwarten.

Es gibt derzeit noch relativ wenige OLED-Beleuchtungsprodukte auf dem Markt, die zudem unterschiedlich aufgebaut sind. Auf Grund der dynamischen Entwicklung der neuartigen auf Nanotechnik basierenden Beleuchtungstechniken ist derzeit nicht absehbar, welche dieser Techniken in der Zukunft eine wesentliche Rolle spielen wird.

Für das Umweltbundesamt ist die frühzeitige Prüfung der Umweltverträglichkeit neuer Techniken ein wichtiges Anliegen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Nanomaterialien in unmittelbarem Kontakt mit dem Menschen kommen oder auf ihrem Lebensweg in die Umwelt gelangen. Im Falle von OLEDs ist das jedoch nicht zu besorgen.

Offene Fragen bestehen hinsichtlich der Bedeutung für den Ressourcenverbrauch sowie der Möglichkeit der Rückgewinnung der eingesetzten Stoffe. Für OLEDs liegen diesbezüglich bisher nur unzureichend Daten vor. Wir empfehlen daher, diese Problematik weiter zu untersuchen.

6 Literatur und Quellen

Barruetabena, L., Arieta-Araunabena, M. and C. Delgado (2011): Study of OLED end of time treatment. ISFR 2011, Toledo.

BMBF (2012): Organische Elektronik - Hightech aus Kunststoff. 07.05.2012, <http://www.bmbf.de/de/16267.php>

Colegrove, J. (2009): OLED lighting in 2009 and beyond: The bright future. 2009. DisplaySearch.

Erdmann, L., Graedel, T. (2011): The Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. Environmental Science & Technology 45(18), S. 7620-7630/7620-7630

- OLLA (2009):** OLLA Project Report, Final Activity Report. March 2009. <http://www.olla-projekt.org>.
- Schlaak,A. (2012):** OLEDs – effizient, preiswert und umweltverträglich. BMBF fördert neues Forschungsprojekt. <http://idw-online.de/pages/de/news500889> (Abruf 12.10.2012).
- Spengler,L., Reihlen,A., Sander,K., Jepsen,D. und N. Reintjes:** (Veröffentlichung in Vorbereitung): Expertise Leuchtdioden, FKZ 3709 93 306.
- SSK (2010):** Moderne Lichtquellen – Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Verabschiedet in der 242. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 01./02. Juli 2010, Bonn.
- Steinfeldt,M., von Gleich,A., Petschow,U., Haum,R., Chudoba,T. und S. Haubold (2004):** Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. Fallstudie 3: Nanoinnovationen im Displaybereich. Schriftenreihe des IÖW 177/04.
- UBA (2009):** Beleuchtungstechnik mit geringerer Umweltbelastung. Umweltbundesamt, 18.03.2009. www.uba.de/energie/licht
- US DOE (Department of Energy)(2011):** Solid-state lightning Research and Development: Manufacturing Roadmap. July 2011.

Autoren:

Das Datenblatt wurde von Mitgliedern des Arbeitskreises „Nanotechnik“ des Umweltbundesamtes erstellt. Insbesondere haben daran mitgewirkt:

Petra Apel (II 1.2 – Toxikologie, Gesundheitsbezogene Umweltbeobachtung)

Dr. Wolfgang Dubbert (III 2.1 – Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen)

Christoph Mordziol (I 2.4 – Energieeffizienz)

Dr. Ines Oehme (III 1.3 – Ökodesign, Umweltkennzeichnung und umweltfreundliche Beschaffung)

Dr. Kathrin Schwirn (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

Dr. Doris Völker (IV 2.2 – Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel, Nanomaterialien)

IMPRESSUM

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau

Tel.: 0340/2103-0

Telefax: 0340/2103 2285

E-Mail: info@umweltbundesamt.de

Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Fachgebiet: III 2.1 Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen

Dessau-Roßlau, 5. November 2013