

Dr. Jörg Frischeisen

Es werde Licht – mehr Licht!

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2012 mit einem 1. Preis in der Sektion Naturwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2011 an der Universität Augsburg eingereichten Dissertation »Light extraction in organic light-emitting diodes« von Dr. Jörg Frischeisen.

Es werde Licht – mehr Licht!

Organische Leuchtdioden – die Beleuchtung der Zukunft

Wettbewerbsbeitrag zur Teilnahme am Deutschen Studienpreis 2012

Dr. Jörg Frischeisen

Licht in seiner natürlichen Form ist existenziell für alles Leben auf der Erde. In nahezu allen Kulturen wurde die Sonne als Lichtspender angebetet – oder gefürchtet. Auch die christliche Schöpfungsgeschichte bildet hier keine Ausnahme: „Gott sprach: Es werde Licht. Und es wurde Licht. Gott sah, dass das Licht gut war.“ Aber auch heutzutage spielt das Licht eine zentrale Rolle im menschlichen Alltag, stellt doch das Sehen den vermutlich wichtigsten und prägendsten Teil der Sinneswahrnehmung dar. Tagsüber spendet die Sonne unermüdlich Licht, während nachts Häuser und Straßen durch künstliches Licht beleuchtet werden.

Vor einigen Tausend Jahren musste sich der Homo sapiens noch mit offenem Feuer begnügen, das neben der Wärme auch ein wenig Licht spendete. Zumindest etwas bändigen konnte man das Feuer durch die Herstellung von Kerzen oder Öllampen, mit denen gezielt für Beleuchtung und Wohlbefinden in der Nacht gesorgt werden konnte. Letztendlich brachte eine Erfindung von Thomas Alva Edison den Durchbruch: die Glühlampe, betrieben durch elektrischen Strom. Der Stromfluss erhitzt einen Wolframdraht, bis er durch Glühen Licht aussendet, weshalb diese Lampen zu den thermischen Strahlern zählen. Die Glühlampen-Revolution ermöglichte eine Beleuchtung rund um die Uhr sowohl in privaten Haushalten als auch auf den Straßen und in Fabriken. Als positiver Nebeneffekt ging damit eine deutlich reduzierte Brandgefahr einher. Allerdings dauerte es bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts, bis sich die elektrische Beleuchtung durchsetzen konnte, was zum einen am fehlenden Stromnetz und zum anderen an den teuren und kurzlebigen Glühlampen lag. Im Gegensatz zur Sonne, die voraussichtlich noch einige Milliarden Jahre weiter strahlen wird, war die Lebensdauer der ersten Glühlampen mit einigen Stunden alles andere als üppig. Selbst moderne Halogenglühlampen sind nach wenigen Tausend Stunden ausgebrannt. Neben der begrenzten Lebensdauer verlangt auch die mangelhafte Effizienz der Glühlampen nach einem Umbruch. Von der aufgenommenen elektrischen Leistung werden nur ca. 5% in sichtbares Licht umgesetzt, der Rest geht als Wärme verloren. Kein Wunder, dass sich

die Europäische Union für ein schrittweises Herstellungs- und Vertriebsverbot für diese ineffiziente Art der Beleuchtung entschieden hat.

Als Alternativen gab es lange Zeit nur die Leuchtstofflampen, die auf dem Prinzip der Gasentladung durch angelegte elektrische Spannung basieren. Durch den enthaltenen Quecksilberdampf entsteht ultraviolette Strahlung, die wiederum durch eine Beschichtung der Glasröhre mit Leuchtstoff in sichtbares Licht umgewandelt wird. Verglichen mit Glühlampen ist die Effizienz um ein Vielfaches höher, d.h., man bekommt für die gleiche elektrische Leistung deutlich mehr sichtbares Licht. Allerdings enthält das Lampenspektrum durch die Gasentladung eine Reihe scharfer Emissionspeaks, sodass das Licht der Leuchtstofflampen im Vergleich zu einem thermischen Strahler oft als unangenehm empfunden wird. Deshalb konnten sich insbesondere im privaten Bereich Kompaktleuchtstofflampen, häufig auch als Energiesparlampen bezeichnet, trotz ihrer exzellenten Effizienz und besseren Lebensdauer bisher kaum durchsetzen. Nicht zuletzt schrecken viele Kunden durch das enthaltene giftige Quecksilber davor zurück, ihre lieb gewonnenen, aber in Zukunft verbotenen Glühlampen durch Energiesparlampen zu ersetzen.

Die Revolution am Lichtmarkt

Welche Alternativen gibt es für den Verbraucher nach dem Verbot der Glühlampe und den negativen Berichterstattungen über Energiesparlampen? Die Zukunft heißt ganz klar „Solid-State Lighting“, was einfach übersetzt Festkörper-Beleuchtung bedeutet. Diese Lichtquellen verwenden spezielle Halbleitermaterialien, und das Licht entsteht über den Prozess der Elektrolumineszenz, d.h., Elektrizität wird direkt in Licht umgewandelt. Im Gegensatz zu einem thermischen Strahler geht dabei nur ein kleiner Teil der elektrischen Leistung als Wärme verloren, und die Lichtquellen haben eine Effizienz, die um ein Vielfaches über der von Glühlampen liegt. Prinzipiell unterscheidet man bei Festkörper-Beleuchtung zwischen anorganischen Leuchtdioden (LEDs) und organischen Leuchtdioden (OLEDs).

LEDs sind bereits seit längerem als einfarbige Statusleuchten an Tastaturen, PC-Gehäusen und in Autos verbreitet. Erst seit einigen Jahren konnte die Effizienz von LEDs derart gesteigert und die Herstellungskosten dermaßen gesenkt werden, dass LEDs auch als Ersatz für Glühlampen und Leuchtstoffröhren infrage kommen. Neben der exzellenten Effizienz spricht vor allem auch eine Lebensdauer von mehreren Zehntausend Stunden für den Einsatz von LED-Lampen. Der Vorteil der hohen Lebensdauer macht sich insbesondere beim Einsatz in großen Fabrikhallen und Tunnels bezahlt, wo ein Austausch von defekten Leuchtmitteln sehr aufwendig und damit teuer ist. Aber auch für den Endverbraucher gibt es inzwischen sehr attraktive LED-Lampen, die das äußere Erscheinungsbild der Glühlampen nachahmen und ganz einfach in den üblichen E27-

Lampensockel eingeschraubt werden können. Ein weiterer und vielleicht entscheidender Pluspunkt ist die Tatsache, dass LED-Lampen frei von Quecksilber sind und damit als „grüne Technologie“ vom Verbraucher akzeptiert werden. Dies gilt im Übrigen auch für OLEDs, weshalb sie neben LEDs als Hoffnungsträger für den zukünftigen Lichtmarkt gelten.

Im Gegensatz zu LEDs, die auf Materialien wie Galliumnitrid basieren, werden in OLEDs organische Materialien eingesetzt, d.h. Moleküle oder Polymere auf Kohlenstoffbasis. OLEDs sind im Gegensatz zu LEDs keine Punktlichtquellen, sondern großflächige, dünne Lichtquellen, die ein angenehmes diffuses Licht abstrahlen. Die Farben- und Formenvielfalt von OLEDs ist nahezu unbegrenzt, wie in Abbildung 1 gezeigt wird. Als Analogon in der Natur könnte man LEDs mit der hellen und annähernd punktförmigen Sonne vergleichen, während OLEDs dem ausgedehnten, diffus leuchtenden Himmel entsprechen. Durch eine Kombination von LEDs und OLEDs wäre damit eine Nachahmung des natürlichen Tageslichts auch in Innenräumen möglich. In der Tat gibt es auch erste kommerzielle Produkte wie die PirOLED von OSRAM, die LEDs und OLEDs kombinieren (vgl. Abbildung 1).

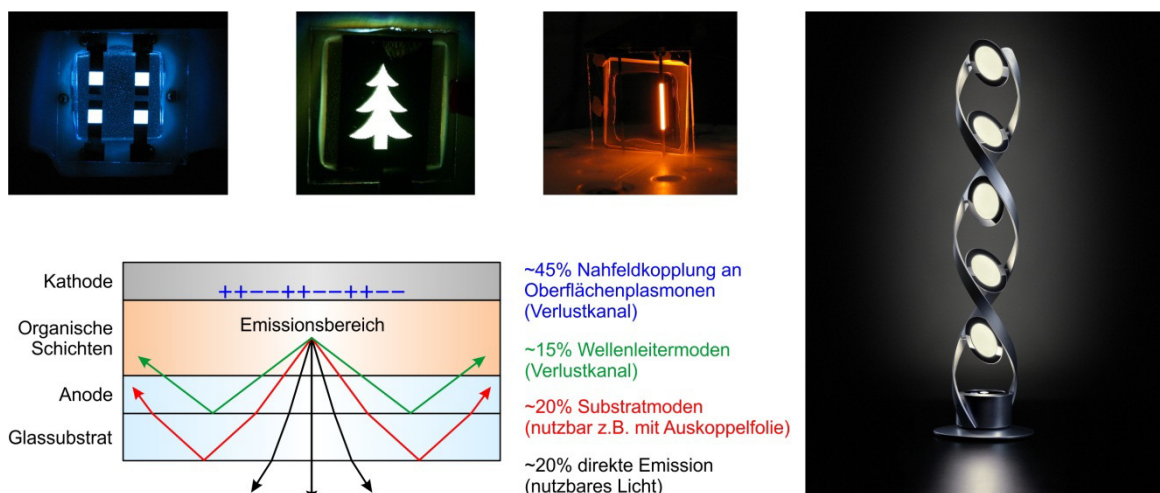


Abbildung 1: Obere Reihe: Verschiedene OLED-Labor-Prototypen mit unterschiedlichen Formen und Farben. Links unten: Vereinfachter Schichtaufbau einer OLED mit Illustration einer typischen optischen Strahlungsverteilung. Rechts: Tischleuchte PirOLED (88 cm hoch) von OSRAM mit einer Kombination von LEDs und OLEDs. (Quelle: [http://www.osram.de/osram_de/Presse/Fachpresse/Optohalbleiter_\(LED,_Laser\)/2010/101105_PirOLED.html](http://www.osram.de/osram_de/Presse/Fachpresse/Optohalbleiter_(LED,_Laser)/2010/101105_PirOLED.html))

Das Besondere an OLEDs ist, dass die organischen Schichten eine Dicke von lediglich einigen Hundert Nanometern besitzen, also weniger als ein Tausendstel Millimeter. Verglichen mit einem typischen OLED-Schichtaufbau ist ein menschliches Haar mehr als hundert Mal dicker. Manche der verwendeten organischen Materialien haben einen Preis pro Kilogramm, der den von Gold bei Weitem übersteigt. In Anbetracht der dünnen Schichten braucht man aber nur wenige Milligramm pro Quadratmeter OLED-Fläche, sodass sich die hohen Materialkosten wieder

relativieren. Teuer sind vor allem spezielle lichtemittierende Moleküle, die in dotierten Materialsystemen eingesetzt werden, d.h. kombiniert mit einem günstigeren Matrixmaterial.

Bei der Herstellung von OLEDs werden die organischen Materialien meist auf ein Glassubstrat aufgedampft. Eingebettet werden die Schichten zwischen zwei großflächigen Elektroden, wobei eine davon in der Regel aus einem durchsichtigen leitfähigen Material besteht. Die andere Elektrode wird häufig über eine Aluminium- oder Silberschicht realisiert, die gleichzeitig dafür sorgt, dass das Licht in Richtung des Glassubstrats reflektiert wird. Daneben gibt es auch Untersuchungen zu vollständig transparenten OLEDs, die im ausgeschalteten Zustand wie normales Glas aussehen. Diese Variante ermöglicht bisher völlig neuartige Anwendungen wie z.B. beschichtete OLED-Fenster, die tagsüber transparent sind, während sie nachts auf der ganzen Fläche homogen strahlen und den Raum indirekt beleuchten. Man kann sogar noch einen Schritt weiter gehen und statt eines starren Glassubstrats eine dünne Folie als Grundlage verwenden. Damit können beleuchtete Kleidungsstücke oder OLED-Displays zum Aufrollen Realität werden. Abgesehen von der Verwendung in Displays haben OLEDs vor allem ein großes Potenzial für Anwendungen in der Allgemeinbeleuchtung. In den letzten Jahren konnten die Lebensdauer und Effizienz von OLEDs zwar schon deutlich erhöht werden, nach wie vor stellt aber eine stark limitierte Lichtauskopplung aus den dünnen organischen Schichten eine Herausforderung für Industrie und Wissenschaft dar.

Lampen-Schlussverkauf?

„Alles muss raus!“ sollte idealerweise auch für das erzeugte Licht im Inneren der OLED gelten. Obwohl die Umwandlung von Strom in Licht bereits sehr effizient ist, kann nur ein kleiner Teil der erzeugten Strahlungsleistung ausgekoppelt und für die Beleuchtung genutzt werden. Ein Grund für die Verluste ist der Übergang vom Glas zur Luft. An dieser Grenzschicht wird Licht reflektiert, wenn es unter einem Winkel von mehr als 42° auftrifft. Der reflektierte Anteil bleibt im Bauteil gefangen und wird als Substratmode bezeichnet. Zum Glück ist die Auskopplung der Substratmoden noch relativ leicht und kostengünstig zu realisieren, indem man die Glasoberfläche aufraut oder gezielt strukturiert. Leider wird sehr viel Strahlungsleistung auch in zwei andere optische Kanäle eingekoppelt: in Wellenleitermoden und insbesondere in Oberflächenplasmonen. Bei Wellenleitermoden wird das Licht in den organischen Schichten unter einem derart großen Winkel abgestrahlt, dass es bereits am Übergang zum Glas vollständig reflektiert wird. Als Folge läuft das Licht zwischen der Grenze zum Glas und zum Metall hin und her, bis es schließlich irgendwo absorbiert wird und verloren geht. Dieser Totalreflexions-Effekt wird in Glasfasern absichtlich zur Lichtleitung genutzt, in OLEDs stellt er dagegen ein grundlegendes physikalisches Problem dar, das die Energieeffizienz reduziert. Zum Thema

Oberflächenplasmonen fällt es schwer, ein geeignetes Analogon aus dem Alltag zu finden. Genau genommen handelt es sich bei diesem Phänomen um elektromagnetische Oberflächenwellen, die am ehesten noch mit Wasserwellen auf einem Teich zu vergleichen sind. Stellt man sich vor, dass man einen Stein ins Wasser wirft, so breiten sich um die Eindringstelle kreisförmige Wellen aus. Oberflächenplasmonen sind stark vereinfacht so etwas Ähnliches, nur dass man statt einer Wasseroberfläche eine Metallgrenzschicht hat. Es ist offensichtlich, dass die Erzeugung der Wellen relativ einfach ist, während es beinahe unmöglich erscheint, die Energie wieder aus den Wellen zurückzugewinnen. Ganz so verhält es sich in OLEDs, weshalb in typischen Bauteilen ein erheblicher Teil der Strahlungsleistung an Oberflächenplasmonen verloren geht.

Insgesamt können typischerweise nur etwa 40% der erzeugten Strahlungsleistung genutzt werden, sodass die Lichtauskopplung den mit Abstand größten Hebel für eine weitere Steigerung der Energieeffizienz von OLEDs darstellt. Im Rahmen der Dissertation werden verschiedene Methoden für eine verbesserte Effizienz von OLEDs sowohl experimentell als auch mittels optischer Simulationen untersucht und optimiert. Insbesondere werden neue Methoden vorgestellt, die optische Verluste teilweise zurückgewinnen oder die Anregung unerwünschter optischer Kanäle von vornherein reduzieren

Wie DVDs beim Stromsparen helfen

Eine der drei wichtigsten vorgestellten Methoden basiert auf der Streuung an periodischen Strukturen. In stark vereinfachter Weise ähnelt das Funktionsprinzip dem eines Autos, das über eine Reihe von Bodenwellen fährt und dabei aufgeschaukelt wird. Während die Bodenwellen einen Abstand von mehreren Metern haben, muss man die Abstände der periodischen Strukturen in der OLED um das Millionenfache kleiner machen. Nur dann kann man Wellenleitermoden und Oberflächenplasmonen effektiv streuen und ihre Ausbreitungsrichtung ändern, sodass sie als nutzbares Licht ausgekoppelt und damit effizientere OLEDs realisiert werden können.

Generell wird die Herstellung von solch feinen Mikrostrukturen umso teurer, je kleiner ihr Abstand ist. Im Gegensatz zu anderen publizierten Arbeiten, wo meist Strukturen mit Abständen um die 0,5 μm eingesetzt wurden, wird im Rahmen der Doktorarbeit die Funktionsweise auch mit größeren Perioden mit fast Mikrometer-Skala nachgewiesen. Solche Strukturen sind über ein kostengünstiges Stempel-Verfahren („Nanoimprint“) auch großtechnisch herstellbar und damit für die OLED-Fertigung interessant.

Zum Beweis der Realisierbarkeit dieses Ansatzes werden vereinfachte OLED-Aufbauten auf einer DVD-Struktur hergestellt. Auf einer DVD sind die digitalen Informationen entlang einer Spur gespeichert und können durch Abtasten mit einem Laser ausgelesen werden. Unter dem

Rasterkraftmikroskop kann man bei 10.000-facher Vergrößerung die einzelnen Vertiefungen erkennen (vgl. Abbildung 2), die der DVD-Spieler als „0“ bzw. „1“ erkennt und in die gewünschten Bild- und Tonaufnahmen umrechnet. Welche Art von Informationen auf der verwendeten DVD gespeichert ist, macht im Experiment mit der OLED keinen Unterschied. Hier nutzt man lediglich die Tatsache, dass der Abstand zwischen zwei Spuren mit ca. 740 nm (= 0,00074 mm) hervorragend geeignet ist, um Oberflächenplasmonen als sichtbares Licht zurückzugewinnen. Die erfolgreiche Durchführung dieses Experiments beweist eindrucksvoll, dass man die nötigen Gitterstrukturen großflächig und günstig herstellen könnte, wenn man bedenkt, in welchen Mengen und zu welchem günstigem Preis man heute DVDs kaufen kann.

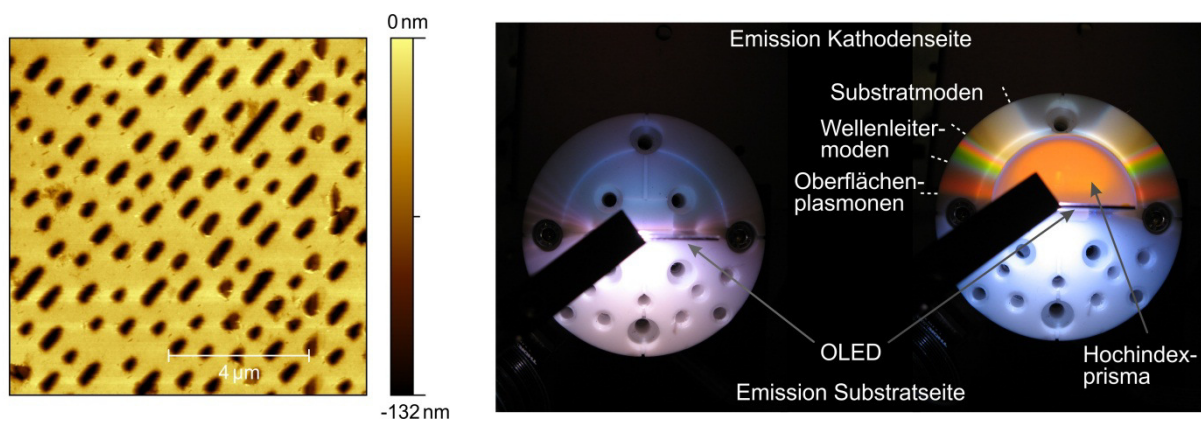


Abbildung 2: Links: Aufnahme eines DVD-Gitters mit einem Rasterkraftmikroskop bei ungefähr 10.000-facher Vergrößerung. Die Spur der DVD läuft diagonal von links unten nach rechts oben, und der Abstand zwischen zwei Spuren beträgt ca. 740 nm. Rechts: Nachweis des Funktionsprinzips der Hochindexkopplung (linker Teil des Fotos ohne, rechter Teil mit Hochindexkopplung). Im Fall der Hochindexkopplung erkennt man auf dem Foto deutlich die Auskopplung von optischen Kanälen, die normalerweise verloren wären.

Mehr Licht durch passenden Brechungsindex

Schon Goethe wurde das Bedürfnis nach „Mehr Licht!“ zugeschrieben. Diesem Wunsch könnte man auch mit der zweiten untersuchten Methode entsprechen. Hierbei nutzt man den Brechungsindex von bestimmten Materialien, um Lichtverluste in der OLED zurückzugewinnen und dadurch die Effizienz zu steigern. Den Einfluss unterschiedlicher Brechungsindizes kennt man aus dem Alltag beispielsweise durch den geknickt aussehenden Strohhalm im Wasserglas oder durch das Flimmern der Luft über einer heißen Straße im Sommer. In der OLED führt das Vorhandensein von Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes einerseits zu den oben aufgeführten Problemen wie der Einkopplung von Licht in Substrat- oder Wellenleitermoden. Andererseits kann man durch geschickte Veränderung der Metallelektrode und durch Aufbringen einer zusätzlichen durchsichtigen Schicht mit sehr hohem Brechungsindex einen Teil der Verluste wieder zurückgewinnen und auskoppeln. Die Funktionsfähigkeit dieser patentierten „Hochindexkopplung“ kann man auf den Fotos in Abbildung 2 daran erkennen, dass ein Teil der normalerweise verlorenen Strahlung in einer Art Regenbogen auf der Kathodenseite abgestrahlt

wird. Für die Verwendung in kommerziellen Bauteilen ist die Aufspaltung in verschiedene Farben in der Regel unerwünscht und müsste durch geeignete Streuscheiben wieder homogenisiert werden. Mit dieser neuartigen Methode könnte eine Lichtquelle entwickelt werden, die Licht auf beide Seiten abstrahlt und trotzdem im ausgeschalteten Zustand von der Glasseite her wie ein undurchsichtiger Spiegel aussieht. Auch die Methode der Hochindexkopplung ist sehr gut dazu geeignet, mit der modernen OLED-Produktion kombiniert zu werden.

Nur nicht die Orientierung verlieren

Im Gegensatz zu den beiden bisher diskutierten Methoden, mit denen man beabsichtigt Verluste zurückzugewinnen, kann man der Problematik der Lichtauskopplung bereits einen Schritt früher begegnen und versuchen, die optischen Verluste von Anfang an zu minimieren. Es war seit längerem bekannt, dass Polymermaterialien in OLEDs eine sehr gute Lichtauskopplung zeigen, auch wenn sie gegenüber kleinen Molekülen einige andere Nachteile haben. Der Grund für die gute Auskopplung ist, dass sich die langen Polymere größtenteils flach auf dem Glassubstrat anordnen, ähnlich wie eine Portion Spaghetti auf einem Teller. Durch diese Vorzugsorientierung geht deutlich weniger Strahlung an Oberflächenplasmonen verloren. Veranschaulichen kann man sich diesen Effekt abermals durch den Vergleich zu Wasserwellen: Je nachdem, wie gekonnt man im Schwimmbad vom Fünfmerturm aus ins Wasser eintaucht, erzeugt man mehr oder weniger Wellen – und entsprechend mehr oder weniger Schmerzen beim Eintauchen.

Die Forschungen im Rahmen der Doktorarbeit führen zu der absolut neuen Erkenntnis, dass selbst aufgedampfte kleine Moleküle eine Vorzugsorientierung relativ zum Substrat aufweisen können. Zum Nachweis der Orientierung wird eine neue Messmethode entwickelt, mit der man vergleichsweise einfach den Grad der Orientierung bestimmen kann. Dies ist vor allem für die schnelle Untersuchung von dotierten Materialsystemen interessant, weil es Tausende mögliche Kombinationen von Emittern und Matrixmaterialien gibt und täglich neu entwickelte organische Moleküle hinzukommen.

Durch den Vergleich von OLEDs mit unterschiedlich orientierten Materialien wird demonstriert, dass durch orientierte Moleküle von vornherein die Ankopplung an Verluste minimiert und folglich die Lichtauskopplung erheblich verbessert werden kann. Für die Industrie ist diese Variante außerordentlich reizvoll, da die Orientierung eine inhärente Eigenschaft des verwendeten Materialsystems ist und mit ihr die verbesserte Lichtauskopplung komplett ohne zusätzliche Kosten einhergeht.

Fortschritt durch Kooperation

Die Bearbeitung von gleich drei komplexen Themen im Rahmen der Dissertation war möglich durch geschickte Kooperationen auf interuniversitärer und sogar internationaler Ebene. Neben der Zusammenarbeit mit anderen Lehrstühlen an der Universität Augsburg wurden wichtige Forschungsergebnisse in einer Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena sowie der Technischen Universität München erzielt. Um nicht nur den Fokus auf universitäre Forschung, sondern auch auf die spätere Anwendung mit im Blick zu haben, wurden zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekte zusammen mit OSRAM OS in Regensburg bearbeitet. Im Rahmen von zwei Forschungsaufenthalten an der Kyushu University in Japan in der Arbeitsgruppe von Prof. Chihaya Adachi – einem der beiden führenden OLED-Forscher Japans – konnten wichtige Erkenntnisse zur Orientierung gewonnen werden. Jede der genannten Kooperationen fruchtete in mindestens einer wissenschaftlichen Publikation in einer angesehenen Fachzeitschrift.

Insgesamt zeigen sich der Innovationsgrad sowie die wissenschaftliche und wirtschaftliche Relevanz der Arbeit an drei Patentanmeldungen, vier internationalen Konferenzvorträgen, 17 Publikationen sowie einem Beitrag zu einem Buchkapitel. Insbesondere ist das wirtschaftliche Einsatzpotenzial hervorzuheben, da die vorgestellten wissenschaftlichen Ergebnisse direkt auf hochmoderne großflächige OLEDs übertragbar sind.

Energiewende durch Energieeinsparung

Was bedeuten die gewonnenen Erkenntnisse konkret für die Endverbraucher in Deutschland? Das ist leicht zu beantworten, wenn man bedenkt, dass eine verbesserte Lichtauskopplung direkt die Energieeffizienz einer Lampe verändert. Durch die vorgestellten Methoden und insbesondere durch die Kombination mehrerer Varianten lässt sich theoretisch eine Auskoppelleffizienz von über 70% erreichen, die das derzeit übliche Maß von ca. 40% bei Weitem übersteigt. Damit kann bei vorgegebener elektrischer Leistung deutlich mehr nutzbares Licht gewonnen werden oder alternativ die Stromdichte gesenkt werden, was zu einer höheren Lebensdauer der OLED und damit über die Jahre zu einer entsprechenden Ressourceneinsparung führt.

Die Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse wird deutlich, wenn man bedenkt, dass weltweit fast ein Fünftel der verwendeten elektrischen Energie für Beleuchtung eingesetzt wird. Vor allem in Privathaushalten wird immer noch ein Großteil des Lichts über ineffiziente und kurzlebige Glühlampen erzeugt. Als Beispiel sei hier ein Bericht des U.S. Department of Energy angeführt, das in einer Studie im Januar 2012 die Anzahl der noch vorhandenen Glühlampen in amerikanischen Haushalten auf 3,6 Milliarden bezifferte, was einer immensen Energieverschwendung

gleichkommt. Für Lichtquellen der Zukunft steht daher insbesondere eine hohe Energieeffizienz im Vordergrund, um für die eingesetzte elektrische Energie möglichst viel nutzbares Licht zu erhalten.

Nicht zuletzt durch die Katastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima wird auch speziell in Deutschland das Thema Energiewende heiß diskutiert. Man will weg von der Kernenergie, aber selbstverständlich sind auch CO₂-Schleudern wie Kohle- und Gaskraftwerke heutzutage keine ökologische Alternative. Was momentan bleibt, sind die erneuerbaren Energien wie Wind-, Wasser- und Solarenergie. Bis diese Technologien aber einen vollständigen Ersatz für bisherige Kraftwerke liefern können, werden noch einige Jahre oder gar Jahrzehnte vergehen. Genauso wichtig wie das Voranbringen der erneuerbaren Energien ist auf der anderen Seite der Aspekt der Energieeinsparung. Würde man weltweit alle Glühlampen durch energieeffiziente Festkörper-Beleuchtung ersetzen, könnte man etliche Kraftwerke abschalten und damit die Energiewende voranbringen sowie die CO₂-Emissionen massiv reduzieren.

Neben all den Vorteilen von LED und OLED bleibt als einziges vorübergehendes Manko ein derzeit noch vergleichsweise hoher Preis. Trotzdem amortisieren sich die Investitionskosten für bereits kommerziell erhältliche LED-Lampen aufgrund der Energieeinsparung bereits nach wenigen Jahren, und es ist absehbar, dass die Preise ähnlich wie im Computersektor rapide fallen werden. Mit diesen „grünen“ Lichtquellen steuert die Menschheit einer leuchtenden – und dabei energiesparenden – Zukunft entgegen.