

# Lichthimmel und Lichttapeten

Organische Leuchtdioden ermöglichen völlig neuartige Beleuchtungsanwendungen.

Markus Klein und Karsten Heuser

Organische Leuchtdioden sind extrem dünne und helle Lichtquellen, die farbiges oder weißes Licht homogen über eine große Fläche verteilt abstrahlen. Damit eröffnen sie künftig neue Einsatzgebiete: in der Architektur ebenso wie in der Werbung oder der Inneneinrichtung – dies reicht vom Lichthimmel über leuchtende Kacheln und Lichttapeten bis zu biegsamen, transparenten Lichtwänden.

Nicht viele Dinge haben eine so grundlegende Bedeutung für den Alltag und das Wohlbefinden der Menschen wie das Licht. Die Entwicklung neuartiger Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung ist daher weltweit von hohem Interesse. Geradezu revolutionäre neue Anwendungsmöglichkeiten versprechen derzeit vor allem die organischen Leuchtdioden, die OLEDs. Der Grund dafür ist einfach: OLEDs sind Flächenstrahler, keine Punktlichtquellen wie Glühlampen oder die stecknadelkopfkleinen anorganischen Leuchtdioden. Bei ihnen strahlt eine große Fläche diffuses Licht ab, ähnlich wie man es von der indirekten Beleuchtung des Tageshimmels gewohnt ist. Ein „Lichthimmel“ aus OLEDs würde daher dem natürlichen Lichtempfinden besser entsprechen als eine Spot-Beleuchtung mit kleinen Lichtquellen.

Außerdem lässt sich mit OLEDs eine sehr gute Farbwiedergabe und damit eine hohe Farbtreue erreichen – wie wichtig das ist, weiß jeder, der schon einmal bei Kunstlicht Kleidung gekauft hat. Zudem bieten OLEDs mit wenig Strom eine sehr gute Lichtausbeute: Bereits beim heutigen Entwicklungsstand sind sie doppelt so effizient und etwa sechsmal langlebiger als Glühlampen. Darüber hinaus enthalten sie anders als heutige Energiesparlampen kein gesundheitsschädliches Quecksilber. Der wichtigste Trumpf der OLEDs ist aber, dass sie extrem dünn, flach, transparent und flexibel sind. Ihre aktive Schicht ist weniger als 500 Nanometer dick. Sie lassen sich auf Glasscheiben aufbringen oder in Zukunft auch auf flexiblen Folien.

In der aktiven, leuchtenden Kunststoffschicht einer OLED befinden sich Ketten aus kleinen organischen Molekülen.<sup>1)</sup> Der Ladungstransport findet in diesen üblicherweise amorphen Schichten über einen Hopping-Mechanismus zwischen lokalisierten  $\pi$ -Elektronen-Zuständen statt: Unter dem Einfluss eines externen elektrischen Feldes springen die Ladungsträger,



also Elektronen und Löcher, entlang der Moleküle und von einem Molekül zum nächsten. In der aktiven Zone formen sie Exzitonen, die anschließend unter Lichtemission zerfallen (Abb. 1). Die Farbe des abgegebenen Lichts hängt von der Struktur der OLED-Moleküle ab – geeignete Moleküle ermöglichen inzwischen alle Farben (Abb. 2).

Um eine weiße OLED-Lichtquelle zu konstruieren, ist eine Mischung aus verschiedenfarbig emittierenden organischen Materialien in einer Schicht oder die Stapelung von Rot-, Grün- und Blauschichten bzw. von grün-blauen und orangefarbenen Emittieren übereinander technisch am einfachsten. Beim Stapel-Verfahren entstehen z. B. durch die Variation der Dicke jeder Schicht unterschiedliche Weißtöne. Allerdings hat man bei diesen Verfahren durch die Anordnung der Schichten und die Zusammensetzung der Kunst-

Ein Szenario für die künftige Anwendung organischer Leuchtdioden: transparente Lichtwände, steuerbare Lichthimmel, Wohlfühlbeleuchtung und Entertainment.

1) Z. B. Spiro-Verbindungen (verbundene Bi- oder Oligophenyle) oder Alq<sub>3</sub> (s. Artikel von W. Brütting und W. Rieff).

## KOMPAKT

- Organische Leuchtdioden (OLEDs) strahlen über eine größere Fläche diffuses Licht ab und ähneln somit dem natürlichen Tageslicht.
- Ihr größter Vorteil ist, dass sie extrem dünn, flach, transparent und flexibel sind und sich daher auch auf flexible Folien bringen lassen.
- Geeignete Moleküle erlauben es, alle Farben zu erzeugen, die sich über- und nebeneinander anordnen lassen.
- Anwendungen wie Signalleuchten (Notausgang) sind bereits in Sicht, für die Allgemeinbeleuchtung oder LCD-Hinterleuchten müssen die Effizienzen, die Leuchtdichten sowie die Lebensdauern aber noch ansteigen.

Dr. Markus Klein und Dr. Karsten Heuser, Osram Opto Semiconductors, Leibnizstr. 4, 93055 Regensburg

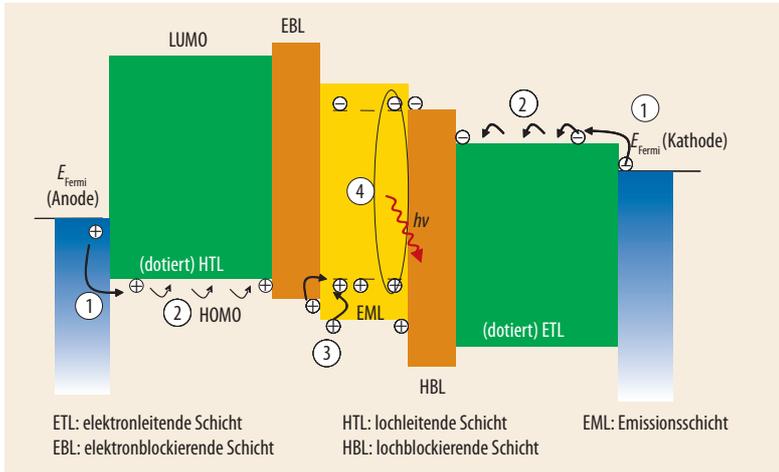


Abb. 1 In einer OLED-Lichtquelle bewegen sich die Ladungsträger nach der Injektion (1) durch einen Hopping-Mechanismus (2) entlang lokalisierter  $\pi$ -Elektronen-Zustände der verschiedenen organischen Moleküle. In der aktiven Zone sammeln sich Elektronen und Löcher (3), bilden Exzitonen und zerfallen schließlich unter Lichtemission (4).

stoffe die Farbe der Lichtquelle festgelegt – die Farbe ändert sich dann eher ungewollt, da die Materialien unterschiedlich altern. Ist die Lichtquelle hingegen so konstruiert, dass die Rot-, Grün- und Blauschichten nicht über-, sondern nebeneinander liegen, ergibt sich die Möglichkeit, die Helligkeit jeder Farbe separat zu verändern, indem der elektrische Stromfluss der entsprechenden Flächen geregelt wird. So lässt sich eine große Bandbreite unterschiedlicher Lichtstimmungen erzeugen. Doch natürlich sind Lichtquellen mit lateraler Strukturierung komplizierter und daher teurer herzustellen als solche ohne Strukturierung.

Eine andere vielversprechende Technologie ist bei etlichen anorganischen LEDs der Schlüssel, um Weißlicht zu erzeugen: die Kombination einer blau strahlenden Lichtquelle mit einem sie umgebenden Leuchtstoff – im Fall der LED meist einem Cer-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat. Das  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  absorbiert einen Teil der blauen Photonen und reemittiert sie bei einer längeren Wellenlänge. Da diese Photonen im gelben Bereich des Spektrums liegen, ergibt die Kombination aus dem blauen Licht der ursprünglichen Lichtquelle und dem gelben Phosphoreszenzlicht in der Summe weißes Licht. Dieses Verfahren ist einfach und kostengünstig, und man braucht nicht zu befürchten, dass verschiedenfarbige Emissionsschichten unterschiedlich altern. Zudem lässt sich durch Dickenvariation der Leuchtstoffschicht das Weißlicht modifizieren und über die Partikelgröße des Pulvers aus  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  die Lichtauskopplung aus der aktiven Schicht und damit die Effizienz der Lichtquelle optimieren. Allerdings gibt es bei den OLED-Lichtquellen derzeit die Schwierigkeit, dass die Langzeitstabilität von kräftig blau leuchtenden Materialien noch begrenzt ist.

Ein OLED-Flächenstrahler, etwa als 20 mal 20 Zentimeter große Kachel, lässt sich heute z. B. folgendermaßen fertigen: Zunächst wird ein Glaträger mit einer dünnen, optisch transparenten, elektrisch leitenden

Schicht aus Indium-Zinnoxid bedeckt. Darauf werden im Vakuum so viele Schichten verschiedener OLED-Moleküle aufgedampft, wie sie für den gewünschten Leuchteffekt nötig sind – dabei reicht pro Quadratmeter Leuchtfläche etwa ein Gramm Material. Es folgen ein Kontakt aus Metall und schließlich eine Verkapselung mit Trocknungsmittel und Deckglas (Abb. 3). Damit schützt man die Schichten vor störenden Umwelteinflüssen: Feuchtigkeit, zu hohe Temperaturen, zu viel Sauerstoff und UV-Licht können Degradationseffekte erzeugen und die OLED-Lampe zu schnell altern lassen.

### Dünne Flächenstrahler mit hoher Effizienz

In der Entwicklung befinden sich OLEDs heute etwa dort, wo klassische LEDs Anfang der 1990er-Jahre standen, doch nicht zuletzt dank unlängst gestarteter europäischer und deutscher Verbundprojekte kommt die Entwicklung von OLEDs für die Allgemeinbeleuchtung schnell voran. Dazu gehören unter anderem das OLLA-Projekt der Europäischen Union (Organic LEDs for ICT & Lighting Applications) und das Projekt OPAL2008 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung mit den Partnern Osram Opto Semiconductors, BASF, Aixtron, Applied Materials und Philips sowie einer Reihe weiterer Firmen, Universitäten und Forschungsinstitute. Bei OPAL2008 haben sich Partner zusammengetan, die die gesamte Wertschöpfungskette von den Materialien bis zur kompletten OLED-Lampe abdecken – eine gute Voraussetzung, um schnell die Grundlagen sowohl technischer Natur als auch für eine kostengünstige Fertigung zu erarbeiten und in einigen Jahren erfolgreich OLED-Lichtprodukte auf den Markt bringen zu können.

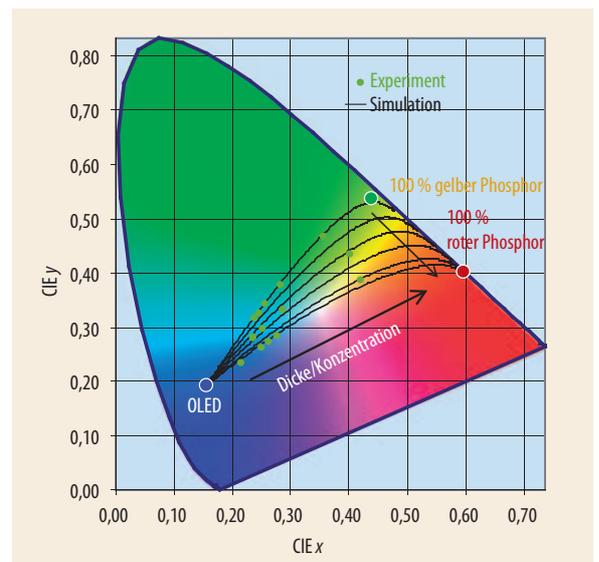


Abb. 2 Dieses Farbkoordinatensystem im Normalvalenzsystem der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) zeigt die Farben, die sich mit einer blauen OLED und einem sie umgebenden Leuchtstoff erreichen lassen. Es zeigt sich, dass der rein gelbe Farbstoff alleine nicht ausreicht, um Weißlicht zu erzeugen – dafür braucht man noch eine Zumischung des roten Farbstoffs.

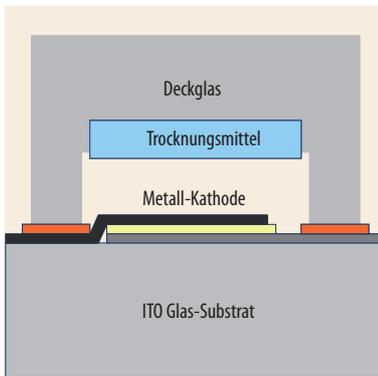


Abb. 3 Prinzipieller Aufbau eines Flächenstrahlers auf Basis organischer Leuchtdioden.

Deutschland und Europa wollen hier eine weltweit führende Rolle einnehmen.

In den Osram-Labors in Regensburg erzielen wir heute mit OLED-Flächenstrahlern bereits Effizienzen von über 45 Lumen pro Watt ( $\text{lm/W}$ ) und Lebensdauern von mehr als 5000 Stunden – konventionelle Glühlampen liegen bei etwa  $12 \text{ lm/W}$  und leben rund 1000 Stunden lang. Halogenlampen liegen bei maximal  $25 \text{ lm/W}$ , und gute Energiesparlampen – das sind kompakte Leuchtstofflampen – erreichen etwa 50 bis  $60 \text{ lm/W}$  und eine Lebensdauer von 20 000 Stunden. Mit den Partnern im Verbundprojekt OPAL2008 wollen wir derartig gute Werte auch bei OLED-Lichtquellen erreichen:  $50 \text{ lm/W}$  und mehr als 10 000 Stunden Lebensdauer sind das erklärte Ziel.

Um die Effizienz zu erhöhen, kann man z. B. phosphoreszente Emittiermaterialien einsetzen. Bei der Rekombination von Elektronen und Löchern entstehen sowohl Singulett- als auch Triplett-Zustände. Über letztere könnte prinzipiell mehr Licht abgestrahlt werden, wenn strahlende Rekombination nicht verboten wäre. Durch Tricks wie den Einsatz von Übergangsmetallen (Iridium oder Platin) lässt sich jedoch erreichen, dass die Triplett-Zustände doch strahlend rekombinieren können (vgl. den Artikel von W. Brütting und W. Riefl). Erste Meldungen, dass weiße OLEDs im Labor mehr als  $60 \text{ lm/W}$  erreichen, kamen im Jahr 2006 aus Japan – von KonicaMinolta ebenso wie aus den Labors von Junji Kido (Yamagata Universität), einem der Pioniere dieser Technik.

Bei der Leuchtdichte für die OLED-Flächenstrahler ist unsere Abteilung bei Osram Opto Semiconductors ebenfalls deutlich vorangekommen: Sie liegt derzeit bei 1000 bis 1500 Candela pro Quadratmeter (1000 bis 1500 „nits“). Das ist bereits zehnmal höher als die Leuchtdichte eines weißen Papiers bei einer typischen Bürobeleuchtung von 500 Lux. Für Signalschilder, etwa von Notausgängen, sind einige hundert nits nötig, für die übliche Allgemeinbeleuchtung etwa 1000 bis 2000 nits, für Hinterleuchtungen von Bildschirmen um die 10 000 nits. Dass letztere so hell sein müssen, liegt daran, dass bei LCD-Bildschirmen zwischen 90 und 95 Prozent des Lichts durch Filterung verloren gehen, bevor es das Display aufleuchten lassen kann – die typische Leuchtdichte eines Notebook-Monitors beträgt zwischen 200 und 600 nits.

## Das Ziel: optimierte Fertigungsprozesse

Die drei großen technischen Herausforderungen für den Einsatz von OLEDs zur Allgemeinbeleuchtung sind:

- Die Zuverlässigkeit, Effizienz und Farbqualität müssen mindestens ebenso gut sein wie die konventioneller Lichtquellen. Hier ist man, wie bereits geschildert, bei OLEDs auf einem sehr guten Weg.
- Die Fertigungsprozesse müssen so gestaltet sein, dass sie die einzigartigen Eigenschaften der OLEDs – dünn, flach, transparent und flexibel – bewahren.
- Und die Herstellungskosten müssen in die Nähe heutiger Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung kommen.

Im Fokus vieler Arbeiten stehen daher die Fertigungsverfahren. So müssen es die Produktionsmethoden erlauben, großflächige OLED-Lichtquellen in zuverlässiger Qualität und Homogenität herzustellen. Die dünnen Schichten müssen sehr präzise kontrollierbar sein, um die Helligkeit und Farbe über sowohl die Fläche als auch über die ganze Lebensdauer hinweg stabil halten zu können. Auch sind speziell auf OLED-Lichtquellen abgestimmte kostengünstige Verfahren erforderlich, denn viele der bisher eingesetzten Fertigungsschritte basieren auf den Erfahrungen, die man bei der Herstellung von OLED-Displays gemacht hat. Für Displays braucht man lithographische Verfahren – etwa aus der LCD-Technik –, um den Displays eine Struktur mit möglichst kleinen Bildpunkten aufzuprägen: Ein Bildpunkt hat dort Abmessungen von 0,1 bis 0,5 Millimetern – für die Beleuchtungstechnik ist das nicht nötig. Plakatativ gesprochen entspricht etwa eine Leuchtkachel mit  $20 \times 20$  Zentimeter Kantenlänge einem einzigen der winzigen Bildpunkte eines Displays. Doch die erlaubte Defektdichte muss deutlich sinken, wenn die Fläche der Lichtquelle zunimmt: So wären etwa zehn Defekte pro Quadratmeter kein Problem bei OLEDs, die nur wenige Quadratzentimeter groß sind – man müsste nur wenige OLEDs als nicht funktionsfähig aussortieren. Die Defekte verhindern, dass ein Bildpunkt aufleuchten kann. Bei Leuchtkacheln, deren Fläche einen Quadratmeter erreicht, wäre die Ausbeute dann nahe Null – denn hier wäre jeder „Bildpunkt“ einen Quadratmeter groß.

Auch wenn künftige OLED-Lichtquellen bei der Allgemeinbeleuchtung nicht direkt in Konkurrenz zu heutigen Beleuchtungslösungen treten, sondern völlig

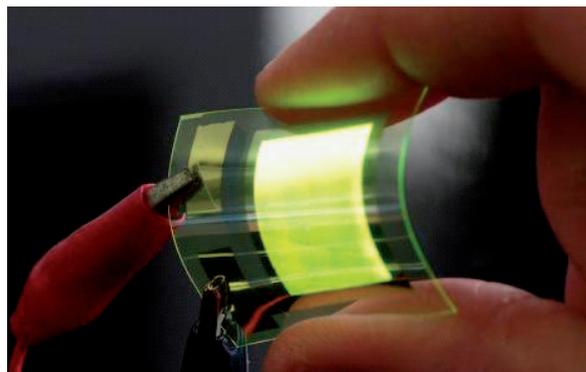
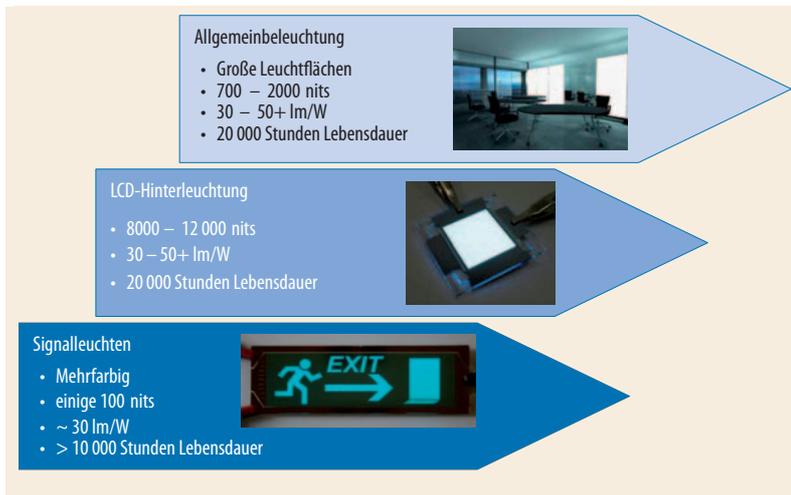


Abb. 4 Für biegsame und zugleich transparente OLED-Lichtquellen gilt es, dünne, flexible und transparente Substrate, Elektroden und Verkapselungen zu entwickeln.



**Abb. 5** OLED-Lichtquellen werden je nach Reifegrad der Technologie unterschiedlichste Anwendungen erschließen.

neue Anwendungen erschließen sollen, so müssen sie doch auf einem angemessenen Preisniveau liegen. Für Displays liegen die Kosten heute zwischen 2000 und 5000 Euro pro Quadratmeter, erste Anwendungsnischen für die Beleuchtung erschließen sich ab etwa 500 Euro pro Quadratmeter Lampenfläche. Für die Allgemeinbeleuchtung sollten die Kosten möglichst unter 50 Euro pro Quadratmeter betragen. Da OLED-Lichtquellen bislang erst im Labormaßstab hergestellt werden, liegen ihre Kosten derzeit noch weit darüber.

Neben der Kostensenkung ist es vor allem entscheidend, die Leistungswerte künftiger OLEDs – also etwa 50 lm/W bei weißem Licht und eine Lebensdauer von mehreren tausend Stunden – auch mit einem flexiblen, transparenten Substrat und einer flexiblen dünnen Verkapselung zu erreichen. Daher wollen wir künftig Elemente wie das starre Glassubstrat, die Glasverkapselung und das Trocknungsmittel durch neue Materialien ersetzen. Am besten wären transparente, biegsame Folien, da sie nicht nur eine kostengünstige Massenfertigung erlauben würden, sondern auch die Vision eines dünnen und flexiblen, vielleicht sogar aufrollbaren, leuchtenden Kunststoffes verwirklichen könnten (Abb. 4).

Um dies zu erreichen, müssen die Barrieren der flexiblen Substrate und Verkapselungen gegen Stoffe, die die OLEDs schädigen würden, ausreichend hoch sein: Für Wassermoleküle müssen sie z. B. für heutige OLED-Bauteile bei Raumtemperatur unter  $10^{-6}$  Gramm pro Quadratmeter und Tag liegen – diese Werte sind zwar mit Glas oder Metallfilmen zu erzielen, aber Glas ist nicht biegsam und Metall nicht transparent. Kunststofffilme erreichen heutzutage nur  $10^{-1}$  g/m<sup>2</sup> · Tag. Lösungsansätze könnten hier die Beschichtung von Kunststofffilmen oder auch die Verwendung von OLED-Schichten sein, die weniger empfindlich auf Sauerstoff und Wasser reagieren – doch hier steht die Forschung noch am Anfang. Dies zu realisieren, wird schwierig, denn es betrifft ein fundamentales Problem: Während durch eine organische Schicht elektrischer Strom fließt, hüpfen die Elektronen und Löcher von Molekül zu Molekül und machen aus den neutralen Molekülen bei gerader Elektronenzahl geladene Moleküle, bei ungerader Elektronenzahl Radikal-Ionen, die dann mit Sauerstoff oder Wasser reagieren können.

2) Marktvolumina sind naturgemäß schwer abzuschätzen und hängen u. a. wesentlich von den technischen Fortschritten in den nächsten Jahren ab. Analysten von IDTechEx sehen allerdings ab etwa 2015 bereits Milliardenmärkte für OLED-Beleuchtung.

## Eine leuchtende Zukunft

Die möglichen Einsatzgebiete von OLED-Lichtquellen werden immer vielfältiger, je besser sich die Technologie beherrschen lässt (Abb. 5). Als erste Einsatzgebiete sehen wir z. B. hochwertige Leuchten zur Stimulations- und Effektbeleuchtung oder flexibel geformte Führungslichter – ob bei Treppen oder im Flugzeug. Wichtig dabei sind die Eigenschaften als Flächenstrahler und die Tatsache, dass man Farbe und Helligkeit aktiv einstellen kann und die leuchtenden Flächen in Form und Größe sehr flexibel wählbar sind. Dies wird dann in einem weiteren Schritt zur Verwendung von OLEDs für leuchtende Werbeflächen aller Art führen: Damit dürfte sich die Werbelandschaft deutlich verändern.<sup>2)</sup>

In der Zukunft könnte das Anwendungsspektrum von OLEDs von Consumer-Produkten über Automobiltechnik und Industrie bis zu Spezialsegmenten wie im Medizinbereich reichen. Bei deutlich reduzierten Herstellungskosten werden die OLEDs letztlich auch die Allgemeinbeleuchtung im Massengeschäft revolutionieren, z. B. als transparente, leuchtende Raumtrenner und diffus leuchtende, flächige Deckenstrahler, deren Licht dem natürlichen Sonnenlicht sehr nahe kommt oder sogar als Lichttapeten – Wände, die aus sich heraus farbig leuchten.

\*

Wir danken dem BMBF für die Unterstützung im Rahmen von OPAL2008 (FKZ 13N8995) und OLLA.

### Literatur

- [1] M. Klein et al., OLED Lighting, in: Proc. SPIE **6486** (2007)
- [2] E. Tsakiridou, Pictures of the Future, Frühjahr 2007, S. 34 ([www.siemens.de/pof](http://www.siemens.de/pof))
- [3] P. Harrop und R. Das, Organic Electronics: Forecasts, Player, Opportunities, 2005-2025, IDTechEx (2006)

### DIE AUTOREN

**Markus Klein** leitet seit 2005 die Entwicklung der OLED-Lichtprodukte bei Osram Opto Semiconductors in Regensburg. Er studierte Elektrotechnik an der TU Karlsruhe und promovierte 1995 in den Forschungslabors von Siemens in Erlangen über nicht-thermische Plasmen. Vor seinem Wechsel zu Osram arbeitete er in der Forschung von Philips in Aachen und der LED-Produktentwicklung im niederländischen Heerlen. Er ist in etlichen internationalen Organisationen tätig und hält über 20 Patente.



**Karsten Heuser** (FV Tiefe Temperaturen) leitet seit 2005 die Technologie-Entwicklung für OLEDs bei Osram Opto Semiconductors in Regensburg. Er promovierte in Physik an der Universität Augsburg und arbeitete seit 1999 in der Forschung von Siemens auf dem Gebiet organischer Leuchtdioden, insbesondere in der Display- und Materialentwicklung.

