

# Leuchtdioden erobern den Alltag

## Anwendungen, Funktion und Herstellungstechnologie

LED (Light Emitting Diodes) werden in zunehmend mehr Anwendungsbereichen als Lichtquelle eingesetzt. Hauptgrund ist die rasante Entwicklung der Effizienz, mit der elektrischer Strom in nutzbares Licht umgewandelt wird. LED verbrauchen weniger Strom als konventionelle Lichtquellen und tragen damit zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei. Das macht sie bei steigenden Energiekosten immer attraktiver. Im Bereich der Straßenbeleuchtung gibt es erste Projekte, die zeigen, dass der geringere Energieverbrauch mittlerweile mit einer Farbwiedergabe einher geht, die sogar besser als bei konventionellen Lampen ist.

Trotz der höheren Anschaffungskosten ist der Betrieb von LED-Straßenleuchten aufgrund der geringeren Betriebskosten und der langen Lebensdauer eine lohnenswerte und ökonomische Alternative für Städte und Kommunen. In Abbildung 1 sind zwei Varianten für die Straßenbeleuchtung dargestellt. Sie zeigt eine LED-Lösung mit einer Effizienz von ca. 100 lm/W, einer Lebensdauer von rund 50.000 Stunden und einem Farbwiedergabeindex (CRI) von 80 im Vergleich mit einer herkömmlichen Natriumdampf-Lampe mit einer Effizienz von

### DIE AUTOREN

#### ANDREAS WEIMAR

Andreas Weimar studierte bis 1999 Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Im Anschluss promovierte er im Bereich Kontaktwiderstandsoptimierungen bei GaN-basierten Laserdioden und trat 2002 bei OSRAM Opto Semiconductors ein. Zunächst war er im Bereich der Chipentwicklung tätig und ist jetzt Abteilungsleiter der Einzelprozessentwicklung im Bereich Front End.



Andreas Weimar  
Tel.: +49 (0)151 14513192  
Fax: +49 (0)941 8504443881  
E-Mail: andreas.weimar@osram-os.com

#### TONY ALBRECHT

Tony Albrecht studierte Physik an der Universität Ulm und promovierte im Bereich Opto-Elektronik (Optisch gepumpte Halbleiter-Scheibenlaser). Er ist seit 1996 bei OSRAM Opto Semiconductors in der Einzelprozessentwicklung, später in der Chipentwicklung. Aktuell ist er in der Produktentwicklung tätig.



Tony Albrecht  
Tel.: +49 (0)151 14513415  
Fax: +49 (0)941 8504441438  
E-Mail: tony.albrecht@osram-os.com

OSRAM Opto Semiconductors GmbH  
Leibnizstr. 4, 93055 Regensburg, Deutschland  
Website: www.osram-os.com

120 lm/W, einer Lebensdauer von 16.000-25.000 Stunden und einem CRI von 30. Die LED-Lösung weist zwar noch eine geringere Effizienz in der Lichterzeugung auf, jedoch verbrauchen LED weniger als die Hälfte an elektrischer Energie. Dies liegt zum einen

an der besseren Farbwiedergabe, durch die weniger Licht für die effektive Beleuchtung benötigt wird, zum anderen daran, dass die LED-Lösung das Licht ausschließlich in die gewünschten Bereiche lenkt, wodurch die Applikationseffizienz steigt.



ABB. 1: Die herkömmliche 250W-Natriumdampf-Lampe (links) verbraucht mehr als doppelt so viel Energie wie die 120W-LED-Straßenleuchte (rechts). Gleichzeitig erhöhen eine homogenere Ausleuchtung und die verbesserte Farbwiedergabe die Sicherheit, da Hindernisse besser erkannt werden können.



ABB. 2: Drei Anwendungsbereiche von LED: Automobil, Consumer und Allgemeinbeleuchtung.

### Etablierte und zukünftige Anwendungsgebiete

LED ermöglichen Lichtquellen in allen Farben des sichtbaren Spektralbereichs. Neben der direkten Erzeugung der einzelnen Farben blau, grün, gelb orange und rot liefert die Kombination von blauen LED mit Farbkonversion über verschiedene Phosphore vielfältige Emissionsspektren. Vor allem Lösungen mit weißem Licht stehen im Fokus der LED-Hersteller, um den Markt der Allgemeinbeleuchtung zu durchdringen. Die wichtigsten Vorteile von LED gegenüber konventionellen Lichtquellen wie Glühlampen, Halogenlampen oder Nieder- und Hochdruckentladungslampen sind die hohe Effizienz und eine lange Lebensdauer von mehr als 50.000 Stunden (abhängig von den Betriebsbedingungen). Hinzu kommt eine größere Designfreiheit für Beleuchtungsanwendungen aller Art aufgrund ihrer geringen Größe, der Dimmbarkeit und der Möglichkeit, jede Farbnuance zu erzeugen. Die Anwendungsbereiche von LED lassen sich grob in drei Bereiche gliedern: Automobil, Consumer und Allgemeinbeleuchtung (Abbildung 2). In der Automobilbranche

werden LED seit Jahrzehnten eingesetzt: Zunächst für die Hinterleuchtung der Armaturen, gefolgt von den Blinklichtern und seit einigen Jahren zunehmend auch für das Tagfahrlicht. Dabei sind markenspezifische Erscheinungsbilder bis hin zu kompletten Scheinwerferlösungen inklusive Fernlicht möglich. Bereits heute enthalten Autos über 200 LED, die meisten davon im Innenbereich. Mit der Zunahme des Einsatzes im Tagfahrlicht oder im Scheinwerfer wird die Anzahl noch weiter steigen.

Beispiele für den Bereich Consumer sind Mobiltelefone. Hier übernehmen LED die Tastatur- und Displayhinterleuchtung sowie das Blitzlicht und auch die Lichtfunktion in Miniprojektoren. Auch bei der Hinterleuchtung von Flachbildschirmen, in der Projektion sowie großen Displays, z. B. in Fußballstadien etablieren sich Leuchtdioden zunehmend.

LED im Bereich Allgemeinbeleuchtung (Solid State Lighting) sind in einigen Marktsegmenten (Architekturbeleuchtung, Dekoration/Verschönerung, Werbeschriften) bereits gut etabliert, in anderen steht der Durchbruch Schritt für Schritt bevor: von

der Außenbeleuchtung über professionelle Shop-Beleuchtung bis hin zum Privatbereich. Speziell im Bereich Außenbeleuchtung, wie Straßen-, Tunnel oder Platzbeleuchtung zeigen bereits verwirklichte Projekte (Abbildung 1) die Vorteile der LED-Lösungen. Es ist davon auszugehen, dass LED-Lösungen in den kommenden zwei bis drei Jahren Massenmärkte erobern werden. Unabhängige Marktforschungsinstitute wie Strategies Unlimited [1] zeigen, dass sich der Hauptmarkt für 2011 in der Allgemeinbeleuchtung im Bereich der LED-Leuchten (Retrofit) befindet. Weitere Anwendungen bei Displays im Einzelhandel, Außenbereich und in der Shopbeleuchtung werden darüber hinaus das Wachstum weiter vorantreiben.

### Funktionsprinzip von LED

Abbildung 3 zeigt schematisch den Querschnitt einer Leuchtdiode. Sie besteht aus einer wenigen Mikrometer dicken, kristallinen Schicht aus Verbindungshalbleitermaterial (Epitaxieschicht) auf einem leitfähigen Substrat. Zur elektrischen Kontaktierung

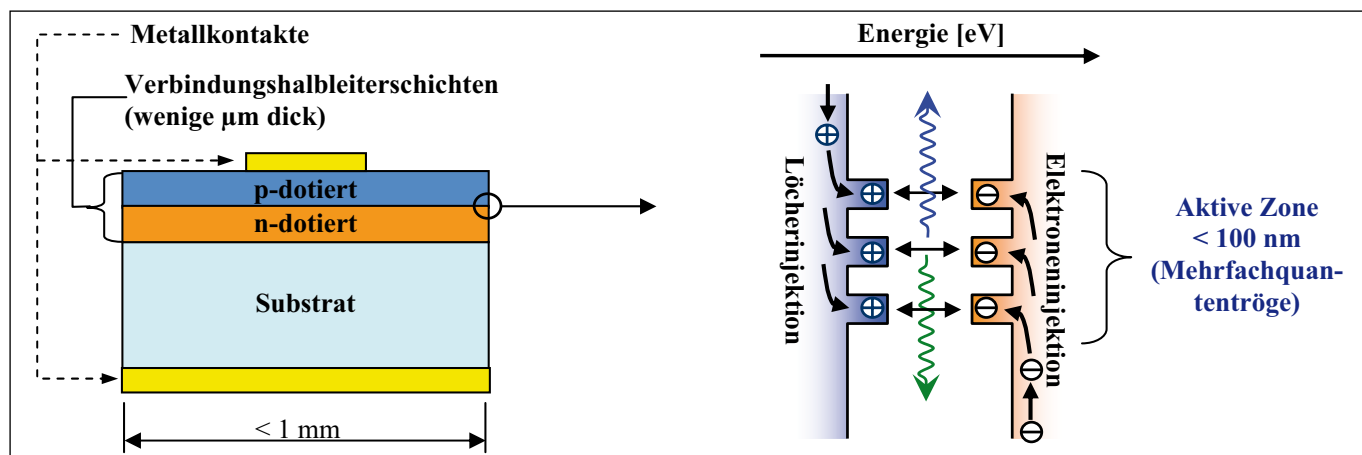


ABB. 3: Schematischer Querschnitt durch eine Leuchtdiode (links) und Energiebandschema der aktiven Zone am pn-Übergang (rechts).

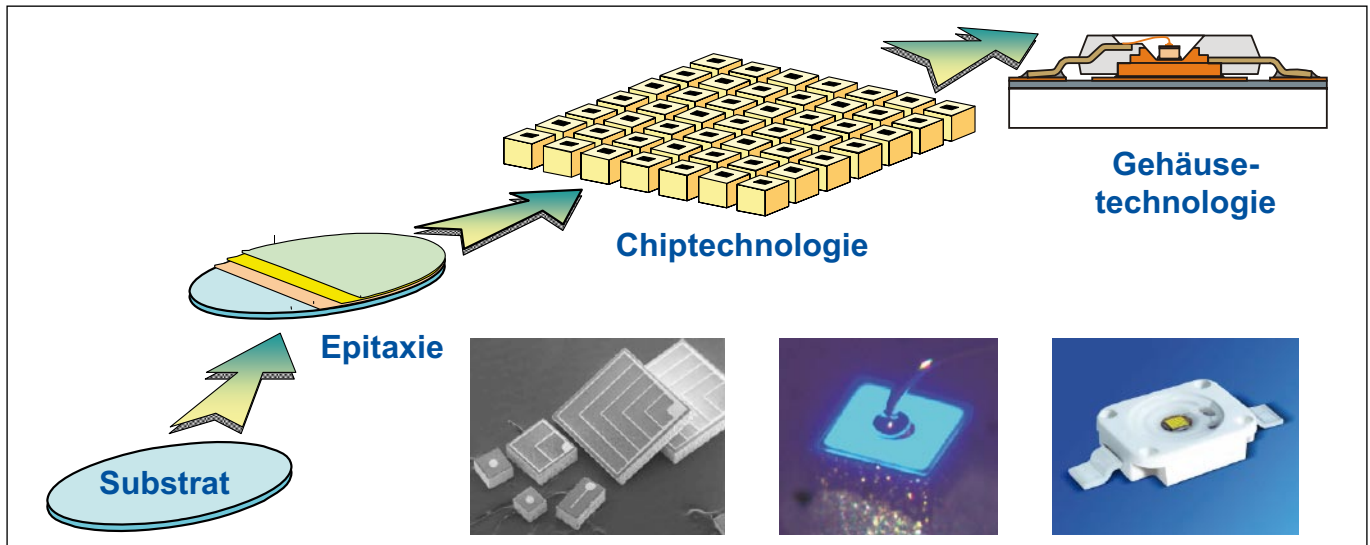


ABB. 4: Der Herstellungsprozess von LED gliedert sich in die Bereiche Epitaxie, Chip- und Gehäusetechnologie.

der Diode dienen Metallkontakte am Substrat und an der oberen Halbleiterschicht. Es gibt auch LED mit einem isolierenden Substrat, wo sich beide elektrischen Kontakte an der Diodenoberfläche befinden. Die Verbindungshalbleiterschichten werden dotiert, um einen pn-Übergang zu erzeugen. Im Betrieb werden die Ladungsträger Elektronen und Löcher (fehlende Elektronen) über die Metallkontakte zum pn-Übergang transportiert. Der pn-Übergang selbst besteht aus einer aktiven Zone, den Mehrfachquantentrögen (Gesamtdicke des Schichtpakets ca. 100 nm), wie in Abbildung 3 rechts in einem Energiebandschema dargestellt. Die im Betrieb injizierten Ladungsträger (Elektronen über n- und Löcher über p-Halbleiter) wer-

den in den Quantentrögen eingefangen. An dieser Stelle kommt es zur strahlenden Rekombination von Elektron-Lochpaaren. Das energiereiche Elektron besetzt das Loch auf einem geringeren Energieniveau und gibt dabei die Energiedifferenz in Form eines Photons ab. Die Materialzusammensetzung in den wenigen Atomlagen dicken Quantentrögen (aktiven Zone) bestimmt den Betrag dieser Energiedifferenz und somit die Wellenlänge der erzeugten Photonen. Das Verhältnis von erzeugten Photonen pro injiziertem Elektron-Lochpaar bezeichnet man als interne Quanteneffizienz, welche im Idealfall bei 100 % liegt. Als geeignete Materialien für die Erzeugung von Licht im sichtbaren Spektralbereich haben sich die III-V-Verbindungshalbleitermaterialien Alln-GaN (blau/grün) und AllnGaP (gelb, orange und rot) durchgesetzt.

für AllnGaP-basierte LED (Durchmesser 50 – 100 µm, Dicke < 1 µm). Die Materialqualität und das Design der Epitaxieschichten sind entscheidend für die interne Quanteneffizienz, mit der Elektron-Lochpaare in Photonen umgewandelt werden. Im blauen und roten Wellenlängenbereich liegen diese Werte bereits bei über 80 %, im Übergangsbereich grün-gelb jedoch unterhalb von 30 %.

Der zweite Herstellungsschritt – die Chip-technologie – hat zum Ziel, die epitaxierten Substrate (Wafer) in viele einzelne LED zu verwandeln. Im Vordergrund steht hier die Optimierung von elektrischer und Lichtauskoppel-effizienz. Für die effiziente Injektion von Ladungsträgern bedarf es zweier Metall-Halbleiterkontakte mit möglichst niedrigem Kontaktwiderstand, um die ohmschen Verluste im Betrieb zu minimieren. Gleichzeitig soll das Chipdesign derart gestaltet werden, dass möglichst alle in den dünnen Epitaxieschichten erzeugten Photonen aus dem Chip auskoppelt werden können. Dazu werden spezielle Auskoppelstrukturen realisiert und die Flächen an absorbierenden Materialien minimiert. Bei beispielsweise blauen LED-Chips liegt die Auskoppel-effizienz bei ca. 75 %.

Auf dem Weg zum einzelnen LED-Chip müssen die Wafer einer Vielzahl von Einzelprozessen unterzogen werden. Dazu gehören Schichtabscheidungen von Metallen und Dielektrika mit Dicken von wenigen nm bis µm, Temperaturbehandlungen, nass- bzw. trockenchemische Ätzschritte, Schleifverfahren zum Waferdünnen u.v.a.. Mit Hilfe von Fotolithographie wird die gleichzeitige Entstehung vieler Einzeldiodenstrukturen auf dem Wafer ermöglicht. Erst am Ende der Prozesskette (bis zu 100 Einzelprozessschritte) werden die einzelnen LED-Chips aus dem Scheibenverbund durch Sägen

### Herstellungsprozess

Der Herstellungsprozess von LED kann grob in drei Bereiche unterteilt werden: Epitaxie, Chip- und Gehäusetechnologie (Abbildung 4).

Im ersten Schritt zur Erzeugung der leuchtaktiven Verbindungshalbleiterschichten bedient man sich der MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy). Dazu werden die für den gewünschten Halbleiterkristall benötigten Atome in Form von gasförmigen Verbindungen in einen Reaktor eingeleitet, in dem die Substrate auf bis zu 1000 °C erhitzt werden. Bei Kontakt mit der heißen Substratoberfläche zersetzen sich die gasförmigen Ausgangsstoffe und die Atome (Al, Ga, In, N bzw. P) ordnen sich bei geeigneter Prozessführung regelmäßig an und bilden so die kristallinen Verbindungshalbleiterschichten. Die vorwiegend verwendeten Substratmaterialien sind Saphir und SiC für GaN-basierte- und GaAs

### • DIE FIRMA

#### OSRAM Opto Semiconductors

Regensburg, Deutschland

OSRAM gehört zum Sektor Industry von Siemens und ist einer der beiden führenden Lichthersteller der Welt. Die Tochtergesellschaft OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Deutschland, bietet ihren Kunden Lösungen in den Bereichen Beleuchtung, Sensorik und Visualisierung, die auf Halbleitertechnologie basieren. Die Fertigung von OSRAM Opto Semiconductors befindet sich in Regensburg (Deutschland) sowie Penang (Malaysia), der Firmensitz der Nordamerika-Zentrale in Sunnyvale (USA) sowie das Asien Headquarter in Hongkong. OSRAM Opto Semiconductors verfügt zudem über eine weltweite Vertriebspräsenz.

[www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)

oder Laserschneiden getrennt. Je nach Kantenlänge der Chips (1 mm bis 0,25 mm) entstehen aus einem 100-mm-Wafer 7500 bis 120.000 einzelne LED-Chips.

Die einzelnen Chips werden nun in einem dritten Schritt in Gehäuse montiert, um eine kostengünstige Weiterverarbeitung in den verschiedensten Anwendungsbereichen zu ermöglichen. Der Chip wird dabei zunächst in ein aus Kunststoff bzw. Keramik bestehendes Gehäuse geklebt oder gelötet. Anschließend wird beim Drahtbonden über einen dünnen Golddraht der elektrische Kontakt von der Chipoberfläche zu einem größeren und zugänglicheren Metallbeinchen hergestellt. Zum Schutz des Chips und der Drahtbondverbindung werden diese mit einem transparenten Kunststoff (meist Silikone) umgossen. Neben der elektrischen Kontaktierung des Chips und dem Schutz von Chip und Golddraht sollte das Gehäuse zum einen die während des Betriebs im Chip entstehende Verlustwärme möglichst gut weiterleiten und zum anderen das aus dem Chip emittierte Licht sehr gut auskoppeln. Die Extraktionseffizienz kann bei Gehäusen mit hochreflektierenden Materialien und linsenartigem Vergussdesign bis zu 95 % betragen.

### Die Farbe des Lichts

Abbildung 5 zeigt das Farbdigramm mit allen vom Menschen wahrnehmbaren Farben (ohne Beachtung der Helligkeit). Mit einzelnen LED ohne zusätzliche Farbkonversion lassen sich alle Farben der Spektralfarblinie herstellen. Wie aber kann man nun Lichtquellen mit Farben innerhalb der Farbfläche, insbesondere weiß realisieren? Dazu ist zunächst zu unterscheiden, ob es sich um Anwendungen handelt, in denen der Mensch das direkte bzw. spektral unveränderte Licht der Quelle betrachtet oder das von Objekten reflektierte Licht. Das menschliche Auge besitzt drei Farbrezeptoren, welche im blauen, grünen und roten Spektralbereich ansprechen. Bei direkter Betrachtung kann also eine Lichtquelle bestehend aus drei LED (Rot, Grün, Blau) alle Farben erzeugen, z. B. auch Gelb, obwohl dieser Wellenlängenbereich in der Lichtquelle gar nicht abgedeckt ist. RGB-Lösungen sind also für Displays, Projektion und LCD-Hinterleuchtung hinsichtlich des maximal darstellbaren Farbbereichs optimal und herkömmlichen Lösungen weit überlegen. Bei indirekter Betrachtung hingegen ist ein gelber Gegenstand, der mit einer RGB-Lichtquelle

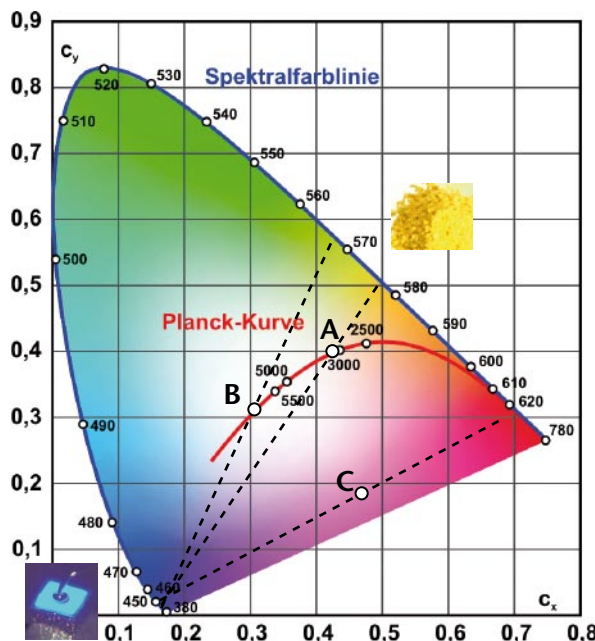
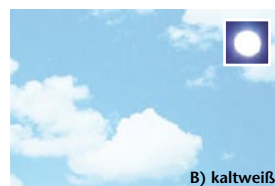


ABB. 5: Normalfarbtabelle zur Darstellung des wahrnehmbaren Farbraums. Mit diskreten LED lassen sich alle Farben der Spektralfarblinie realisieren. Durch Kombination eines blau emittierenden Chips mit Leuchtstoffen unterschiedlichster Materialkompositionen können viele weitere Farbtöne innerhalb des Farbraums erzeugt werden, u.a. auch Kalt- und Warmweiß.



beleuchtet wird, nicht wiederzuerkennen. Bei allen Beleuchtungsanwendungen ist es also anzustreben, eine Lichtquelle zu verwenden, die ein möglichst kontinuierliches Wellenlängenspektrum aufweist, wie es der Mensch von der Sonne oder von der Glühlampe gewohnt ist. Diese Eigenschaft einer Lichtquelle wird Farbwiedergabe genannt und wird über den CRI (Colour Rendering Index) quantifiziert. Eine Möglichkeit, die Farbwiedergabe von LED-Lichtquellen zu verbessern, bietet die Verwendung eines blauen Chips in Kombination mit Farbkonversion. Der zur Konversion erforderliche Leuchtstoff wird hierbei in Form eines Pulvers in das Vergussmaterial des Gehäuses gemischt oder unmittelbar über der Chipemissionsfläche aufgebracht. Er absorbiert einen Teil des blauen Lichts und weist ein breites Emissionsspektrum auf, welches den restlichen Wellenlängenbereich (grün, gelb, orange und rot) abdeckt. Die Mischung von direkter Blauemission des Chips und der Leuchtstoffemission ergibt weiß.

Durch die Verwendung von unterschiedlichen Leuchtstoffen sowie Variationen derer Konzentrationen können die verschiedensten Weißtöne (z. B. kalt- und warmweiß) und viele weitere Farbtöne realisiert werden.

### Die Zukunft der LED

LED begleiten uns bereits jetzt überall in unserem Alltag. Einer der zukünftig am stärksten wachsenden Marktgebiete für diese Lichtquellen ist die Allgemeinbeleuchtung. Hier wird die LED zunehmend konventionelle Lichtquellen ersetzen. Neben der weiteren Entwicklung hinsichtlich der Effizienz des Gesamtsystems ist die Senkung der Herstellungskosten eine zentrale Herausforderung. Der Schlüssel dazu liegt in der Optimierung der Produktivität bei hochvolumiger Fertigung.

LED werden auf Augenhöhe mit anderen, leistungsstarken und verbrauchsarmen Lampentypen, wie beispielsweise Halogen- oder Kompaktleuchtstoff-Produkten, stehen – sie bieten noch ein hohes Potenzial für weitere Leistungssteigerungen.

### Referenzen

- [1] Strategies Unlimited: The Market for High-Brightness LEDs In Lighting (März 2010), [www.strategies-u.com](http://www.strategies-u.com)