

Wie LEDs funktionieren

– eine Einführung in die Grundlagen und Probleme auch für Nichttechniker

LED-Lampen kommen von ihrer Lichtleistung in einen Bereich, die sie auch für Anwendungen in der Film- und Fernsehtechnik als Beleuchtungsmittel interessant machen. Der Autor beschreibt in einer auch für Nichttechniker verständlichen Weise deren Funktionsprinzip und die zu lösenden Probleme, insbesondere die der wirksamen Wärmeableitung aus der Diode und der Lichtauskopplung aus dem Halbleiter.

LED lamps open possibilities for use in film and television content production. The autor describes the way in which light is generated within the diode and outlines solutions to problems such as cooling and efficient light emission. The paper is written to be understandable for non-technicians.

Etwas Theorie

Leuchtdioden bezeichnet man als Licht emittierende Dioden (= LEDs). Sie bestehen normalerweise nur aus einer einzelnen Diode mit einem P-N-Übergang. Die wesentliche Eigenschaft einer Halbleiterdiode bewirkt, dass ein elektrischer Strom nur in einer Richtung fließt.

Die meisten Halbleiter bestehen aus einem schlecht leitenden Material (wie zum Beispiel Silizium) und Germanium, das Atome eines anderen Materials enthält, wird ganz bewusst hinzugefügt. Diesen Prozess des Einbringens von Unreinheiten nennt man „Doping“ oder zu deutsch Dotierung.

Das ursprünglich reine Material ist elektrisch neutral und hat exakt die gleiche Anzahl an Elektronen wie das zugeordnete Atom. Das bedeutet, dass es weder zu viel noch zu wenig Elektronen gibt, also auch keine freien Elektronen vorhanden sind, um einen elektrischen Strom zu übertragen. Der Dotierungsprozess, das Hinzufügen zusätzlicher Atome, führt dazu, dass die zusätzlichen Elektronen innerhalb des Materials „vagabundieren“ und das Material verlassen können. Dazu

müssen entweder in einigen Bereichen mehr Elektronen existieren als benötigt werden, oder es sind zu wenig vorhanden, sodass die Elektronen in die positiv geladenen Löcher hineinpassen. Beide Veränderungen ermöglichen es, dass das Material einen elektrischen Strom leiten kann.

In der üblichen Terminologie wird das Material mit den zusätzlichen Elektronen als N-Typ bezeichnet, da diese extra Elektronen negativ geladene Teilchen sind. Das Material mit einem Mangel an Elektronen (oder mit einem Übermaß an Löchern) wird P-Typ genannt. Wegen der elektrostatischen Anziehung zwischen positiven und negativen Partikeln werden die freien Elektronen von den positiv geladenen Löchern angezogen.

Eine Diode ist ein sehr einfaches Bauteil, in dem N-Typ-Material (mit einem Überschuss an Elektronen) und P-Typ-Material verbunden sind (mit einem Überschuss an Löchern). Der Bereich, an dem die beiden Materialien zusammenkommen, wird als Übergang bezeichnet. Im **Bild 1** wird schematisch verdeutlicht, wie diese Anordnung im Moment des Übergangs aussehen könnte.

Zu Beginn enthält das N-Typ-Material (im Bild 1 blau) auf der rechten Seite zu viele Elektronen und das P-Material (im Bild 1 rot) auf der linken Seite hat zu wenig davon. Das führt zu einer Unausgewogenheit, und die Elektronen und Löcher tendieren dazu, sich von einem Material zum anderen zu bewegen. Sie überqueren, angezogen durch ihre gegensätzlichen elektrostatischen Ladungen, den Übergang.

Treffen ein Loch und ein Elektron aufeinander, gleichen sich ihre Ladungen aus und sie bilden einen neutralen Bereich von jeweils einem Paar – bestehend aus einem Loch und einem Elektron. Dieser Vorgang setzt

sich kontinuierlich fort, bis die im **Bild 2** dargestellte Situation erreicht wird.

Beiderseits eines solchen Übergangs ist ein Bereich, der Verarmungszone (dargestellt in Gelb) genannt wird: Auf beiden Seiten ist die Ladung ausbalanciert und die überzähligen Löcher/Elektronen sind aufgebraucht.

In der Verarmungszone ist das Halbleitermaterial im Wesentlichen in seinem ursprünglichen Zustand wieder hergestellt, und es gibt wie vor der Dotierung keine freien Elektronen mehr, die Strom weiterleiten könnten.

In diesem Zustand – ohne Anlegen einer externen Spannung – wirkt die Diode wie ein Isolator und verhindert die Weiterleitung eines Stroms.

Um einen Strom durch diese Anordnung fließen zu lassen, müssen erst wieder freie Elektronen im rechten N-Material zum P-Material auf der linken Seite wandern und umgekehrt, also die gelb dargestellte Verarmungszone überqueren. Verbindet man das P-Material mit dem positiven Pol einer Stromquelle und das N-Material mit dem negativen (**Bild 3**), kann ein elektrisches Feld über die Diode erzeugt werden, sodass die freien Elektronen in Richtung der positiven Elektrode angezogen und von der negativen abgestoßen

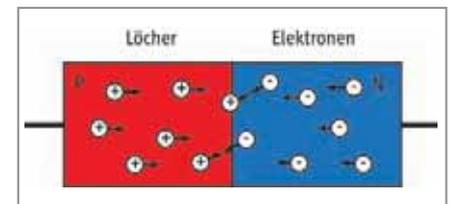


Bild 1. Dioden-Anordnung

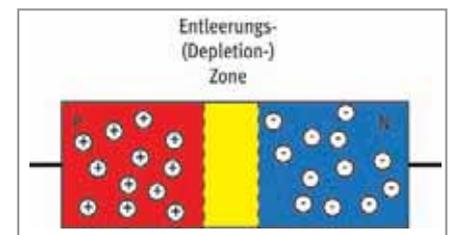


Bild 2. Verarmungszone

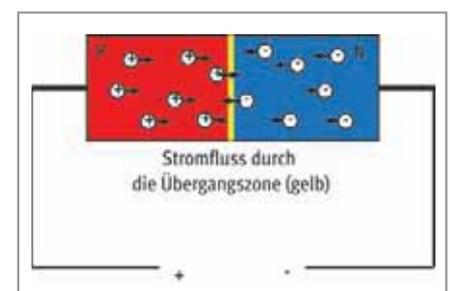


Bild 3. Stromfluss

Mike Wood bietet Consulting im Bereich Technik und Design in der Unterhaltungsindustrie an. Er ist Autor von Fachbeiträgen im Journal der ESTA (Entertainment Services and Technology Association), auf deren Grundlage (Erstveröffentlichung in „ETSA Protocol“: Spring, Summer and Fall 2009) dieser Fachaufsatz entstanden ist.



Aus dem Englischen übertragen von Norbert Bolewski, bearbeitet von Reinhard E. Wagner

werden. Auf die gleiche Weise werden die Löcher in Richtung der negativen Elektrode angezogen und von der positiven abgestoßen. Ist die angelegte Spannung hoch genug, dann werden die Elektronen, die in der Verarmungszone „in den Löchern sitzen“ herausgezogen, die „Verarmung“ wird dadurch beseitigt und alles beginnt erneut. Wird die Spannung umgekehrt angelegt, passiert das Gegenteil. Die Elektronen ziehen sich in Richtung der positiven Elektrode zurück und die Löcher in Richtung zur negativen und vergrößern damit den Bereich der Verarmungszone. Dadurch wird die Diode zu einem besseren Isolator und leitet keine Elektrizität.

Das ist die erforderliche Theorie, um die Prinzipien des Prozesses zu verstehen. Es ließ sich aber nicht vermeiden, doch etwas mehr in die Tiefe zu gehen, um die Grundlagen der Halbleitertheorie noch etwas aufzufrischen.

Aufbau einer Leuchtdiode

In einer Leuchtdiode passiert alles genau in der gleichen Weise wie zuvor illustriert. Tatsächlich sind die meisten Dioden bis zu einem gewissen Grad auch lichtemittierende Dioden, aber ihr Licht ist nicht sichtbar.

LEDs arbeiten meist wie im Bild 3 dargestellt – bekannt als Übergang in Durchlasspolung. Dabei ist die Diode derart verbunden, dass der Strom durch sie hindurchfließt. Elektronen und Löcher fließen kontinuierlich, sie treffen sich in der Übergangszone und werden durch Anlegen einer elektrischen Spannung wieder aufgefüllt. Dort, wo die Elektronen und Löcher zusammentreffen, wird Licht erzeugt.

Wie im **Bild 4** schematisch gezeigt wird, hat ein freies Elektron im Leitungsband des Halbleiters einen höheren Energiezustand als der des Lochs. Und wenn ein höher energetisches Elektron in die Kreisbahn des Loches mit geringerer Energie fällt, so verliert es seine überschüssige Energie. Sie wird in dem Fall als Photon emittiert, das das kleinste Elementarteilchen des Lichts ist.

Wie bereits erwähnt, zeigen viele Halbleiterdioden diesen Effekt. Allerdings ist die Energie in den meisten Materialien derart gering, dass nur Licht einer sehr niedrigen Frequenz, außerhalb des sichtbaren Bereichs im tiefen Infrarot, erzeugt wird.

Der grundsätzliche Unterschied bei den LEDs ist, dass ein Halbleitermaterial verwendet wird, bei dem der Energieabbau viel höher liegt und die emittierte Energie des Photons dann hoch genug ist, um im sichtbaren Bereich des Lichts zu liegen. Das Prinzip ist: Je

höher die Energie des Photons, desto blauer ist das ausgestrahlte Licht. Die meisten Halbleitermaterialien tendieren zu einer einheitlich gleichgroßen Energiebandlücke. Das bedeutet, dass alle Photonen mit etwa der gleichen Energie emittiert werden, also einem sehr schmalen Band von fast monochromatischem Licht, das man von allen LEDs her kennt.

Schaut man auf einen LED-Chip, so scheint es, als ob der gesamte Chip leuchtet und Licht abstrahlt. Der zuvor gemachten Beschreibung ist indessen zu entnehmen, dass tatsächlich nur Photonen in dem Bereich emittiert werden, in dem Elektronen und Löcher nahe der Übergangszone der LED zusammenkommen – dort, wo das N- und das P-Material aufeinandertreffen. Mit anderen Worten ist es nur die „Wurst im Sandwich“, die das Licht erzeugt. Leider ist das nicht ideal für den Lichtaustritt, denn das Licht muss noch eine oder mehrere Schichten und das Material, das für den elektrischen Anschluss gewählt wurde, durchlaufen.

Die Photonen können auf dem Weg nach außen auch auf andere Elektronen treffen und von ihnen absorbiert werden, in dem sie wieder auf eine Kreisbahn höherer Energie geschoben werden. In Nicht-LED-Dioden werden die meisten erzeugten Photonen vom Halbleitermaterial selbst absorbiert und als Wärme umgesetzt.

In den LEDs wird das verwendete Material für die Halbleiterschichten, Verbindungsschichten und für das Gehäuse sorgfältig dahingehend ausgewählt, dass es transparent und dünn genug ist, damit viele der Photonen als sichtbares Licht austreten können. Die Wahl dieser Halbleitermaterialien ist entscheidend. Für ein gutes LED-Material ist es wichtig, die richtige Energielücke (energy gap) zu haben und besonders transparent für diese Lichtfarbe zu sein. In den frühen Tagen der LED-Forschung erwies es sich als ziemlich einfach, Materialien zu finden, die die Lichtfarbe vom Infrarot ins sichtbare Rot ermöglichen. Deshalb kamen zuerst rot leuchtende LEDs auf Galliumarsenid-(GaAs)-Basis in den 1950-er Jahren zur Anwendung.

Forschungen mit komplexeren Materialien mit einer genügend großen Energielücke, um grünes und blaues Licht erzeugen zu können, benötigten einen immens großen Aufwand. Erst in den frühen 1990-er Jahren demonstrierte Shuji Nakamura von Nichia (heute im Materials Department der Universität von Kalifornien in Santa Barbara tätig) ein Galliumnitrid-(GaN)-Material, das auch die Erzeugung blauen Lichts hoher Leistung bot.



Bild 4. Zusammenführung von Elektron und Loch

Obwohl es heute Materialien mit den richtigen Bandlücken gibt, um langwelliges Licht im roten und bernsteinfarbenen (amber) Bereich zu erzeugen, und andere mit größeren Bandlücken für kurze Wellenlängen im Blauen und Ultraviolett, gibt es seltsamerweise eine große Lücke im mittleren Bereich des sichtbaren Lichts, also im Gelben und Grünen, für das noch keine effizienten Materialien entwickelt werden konnten.

Leider ist das genau der Bereich um 555 nm, in dem das menschliche Auge am empfindlichsten ist und in dem eine solche LED in der Praxis besonders nützlich wäre. Diese Lücke reicht bis etwa 625 nm, allerdings gibt es bernsteinfarbene LEDs, deren Leistung und Stabilität jedoch gering sind. Erhebliche Ehren und finanzielles Glück warten auf den Forscher, dem es gelingt, diese Lücke zu schließen.

In der Zwischenzeit gibt es gewissermaßen als Hilfslösung Entwicklungen mit Phosphor unterstützten LEDs, in denen amberfarbene oder gelbe Phosphore mit tiefblau oder UV-Licht strahlenden LEDs zum Leuchten angeregt werden, um diese Farblücke im sichtbaren Licht zu schließen.

Problem: Wärme

Obwohl sich eine LED gegenüber fast allen anderen Methoden der Lichterzeugung in üblichen Lichtquellen deutlich unterscheidet, gibt es ein gemeinsames grundsätzliches Problem, nämlich die zu große Hitze bzw. Wärmestrahlung.

Das Wärme-Management ist das einzige große Problem, wenn neue Leuchten mit LED-Lichtquellen entwickelt werden sollen. Man mag denken, dass bei einem Strahler, der auf einem Halbleiter mit hohem Wirkungsgrad basiert – also sehr leistungsstark Energie in Licht mit wahrnehmbarer Helligkeit wandelt – die Hitzestrahlung minimal ist. Leider stimmt das nicht und die Hitzentwicklung stellt ein Problem dar. Die Lichtausbeute kommerziell erhältlicher LEDs erreicht etwa 100 lm/W für weiße LEDs und etwa 80 lm/W für einzelne Farben (zum Beispiel Grün). Diese Werte klingen im Vergleich zu konventionellen Licht-

quellen sehr gut, sind aber noch weit von den theoretisch möglichen entfernt.

Die maximal mögliche Lichtausbeute für eine weißstrahlende Lichtquelle zu erreichen, ist keine einfache Sache, wie etwa die Änderung der gewünschten Farbtemperatur oder des CRI-Werts, der angestrebt wird. Es lässt sich sehr grob sagen, dass die maximal mögliche Lichtausbeute bei etwa 260 lm/W bei weißem Licht mit einer Farbtemperatur von 3200 K liegt.

Vergleicht man diese Lichtausbeute mit der anderer realer Lichtquellen, so liegt die beste Lichtausbeute mit einer Glühlampe bei etwa 30 lm/W, was etwa einem Wirkungsgrad von 11 % des theoretischen Maximums entspricht. (Der Wirkungsgrad wird üblicherweise in Prozent des theoretischen Maximums angegeben. Für eine Glühlampe ist das $30/260 = 11\%$)

Auf gleicher Basis kommt man bei einer weißen LED mit einer Lichtausbeute von 100 lm/W auf einen Wirkungsgrad von 38 % – sehr viel besser als bei der Glühlampe. Aber das bedeutet trotzdem, dass über 60 % der abgegebenen Energie in Wärme gewandelt wird.

Bei der grünen LED ist es sogar noch schlimmer: Die theoretische Ausgangsleistung für monochromatisches grünes Licht auf der Spitze der Augenempfindlichkeitskurve bei 555 nm ist 683 lm/W. Das bedeutet bei einer Ausgangsleistung von 80 lm/W bei der grünen LED eigentlich weniger als 10 % Wirkungsgrad und liegt damit ziemlich gleich wie bei der Glühlampe, bei der 90 % der abgegebenen Energie in Wärme gewandelt wird.

Wärme stellt das Ende der Energielinie dar und ist ein Grundprinzip der Thermodyna-

mik. Die ersten zwei Gesetze der Thermodynamik lassen sich ganz einfach neu formulieren: *Alles was man macht, endet als Wärme und es gibt nichts, was man dagegen tun kann.*

Ein effizientes thermisches Management der Lichtquelle und ein abgeschlossenes LED-Gehäuse sind die größten Herausforderungen für jeden, der ein LED-Produkt herstellen will, und die gewählten Techniken sind maßgebend für die Wirkung und den Erfolg des Gesamtprojekts.

Jenseits der Leistungsverluste durch Kontakte und Zuführungen wird die Wärme vor allem in der Übergangszone der LED erzeugt, gerade dort, wo es besonders schwierig ist, sie zu reduzieren.

Wie so oft in der Konstruktion von Bauelementen gibt es zwei Anforderungen, die sich einander konträr gegenüberstehen. Einerseits sollte der LED-Chip so offen und unbehindert wie möglich sein, andererseits muss man es für die Wärmeableitung mit effizienten Wärmeleitern umgeben bzw. koppeln. Man muss die Vorderseite der Konstruktion so frei wie möglich für den Austritt des Lichts ausführen, was oft mit einem optischen Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit erfolgt.

Meistens wird die Wärme aus der LED über einen sogenannten Heat-Slug (Kühlschlange) abgeleitet. Dabei handelt es sich um einen im Gehäuse integrierten schneckenförmigen Kühlkörper, der am Gehäuseboden offen liegt und eine gute thermische Anbindung zum Halbleiter hat. Die Vorderseite des Gehäuses ist verschlossen, oft mit einem optischen Material mit niedriger thermischer Leitfähigkeit, und das ganze wirkt wie ein kleiner Ofen.

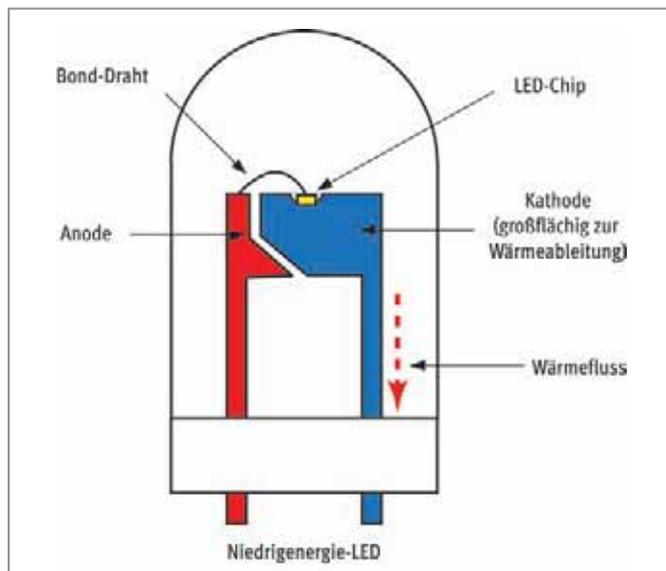
Es ist ein enormer Aufwand an Forschung

und Entwicklung nötig, um ein Design zu finden, das es schafft, diese beiden zuvor genannten Konflikte in Einklang miteinander zu bringen bzw. zu optimieren, um eine hell leuchtende und gleichzeitig effiziente Anordnung zu schaffen. Prinzipiell ist es das Ziel, die Wärme über den Gehäuseboden der Anordnung so schnell wie möglich abzuleiten und gleichzeitig das Licht auf der Vorderseite zu sammeln und den Lichtaustritt zu steuern.

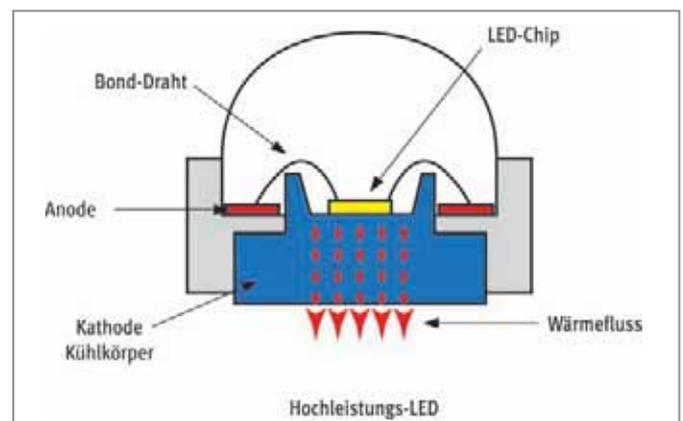
Eine Low-Power-LED (LED mit geringer Leistungsaufnahme, **Bild 5**) erzeugt wenig Wärme und die große Kathode sowie die Zuführungen sind ausreichend, um diese vom LED-Gehäuse abzuhalten.

Schaut man mit einer Lupe auf solch eine 5-mm-Low-Power-LED, so lässt sich erkennen, dass der zur Kathode führende Draht sehr viel stärker als der zur Anode ist, sodass er wie ein Kühlkörper für den LED-Chip wirkt und die Wärmeableitung unterstützt. Der LED-Chip ist direkt mit der Kathodenzuführung gebondet (verklebt). Oft wird ein silberhaltiger Epoxid-Klebstoff verwendet, da er ein guter Leiter sowohl für die Wärme als auch für Strom ist. Solange die Leitungsdrähte – insbesondere zur Kathode – mit einem guten Wärmeleiter auf einer Leiterplatte verlötet sind, wie zum Beispiel Kupferplättchen, ist ein genügend großer Wärmefluss vorhanden, um die gesamte Anordnung kühl zu halten. Der Widerstand solch eines Kühlkörpers und seiner Verbindungen ist etwa $250\text{ }^\circ\text{C/W}$. Das bedeutet, dass pro Watt erzeugter Wärmeleistung auf der einen Seite des Kühlkörpers, die andere um $250\text{ }^\circ\text{C}$ höher sein kann. Bei 100 mW oder 0,1 W bedeutet das eine Temperaturdifferenz von $25\text{ }^\circ\text{C}$ zwischen dem LED-Chip und der Leiterplatte.

Das ist gut, aber was ist mit Anordnungen für 1 W und 5 W? Dann ist die Wärme 50-mal so hoch, und die gilt es abzuleiten. Eine einfache Zuleitung mit $250\text{ }^\circ\text{C/W}$ und einem damit verbundenen erforderlichen Temperaturge-



← **Bild 5.**
Low-Power-LED
Bild 6.
High-Power-LED



fälle von 1250 °C leistet das nicht mehr. **Bild 6** verdeutlicht schematisch die grundsätzliche Anordnung der Einzelelemente einer High-Power-LED (der aktuelle Chip und die Zuleitungen sind oft sehr viel komplexer als hier dargestellt, aber diese Darstellung reicht, um im Wesentlichen den Wärmefluss aufzuzeigen). Der LED-Chip ist auf einer großen Bodenplatte des Kathoden-Kühlkörpers angeordnet (oft über einen Unterträger zum Schutz gegen elektrostatische Ladungen).

Oberflächenmontierte (surface-mounted) LEDs mit hoher Leistung wären ohne die hohe Wärmeableitung derartiger Kühlkörper gar nicht realisierbar, die zusätzlich noch auf eine darunter liegende Leiterplatte gebondet werden, um einen derartig stark wirksamen Wärmepfad für die LED zu erreichen. Die Leiterplatte selbst darf viel dicker als die normalerweise verwendeten Kupfer-Pads (-Kissen) sein. Möglich ist aber auch eine dünne Schicht von Epoxidmaterial auf der Oberseite eines Aluminiumkerns. Es könnte sogar ein Materialgemisch aus Hitze absorbierender Keramik oder einem anderen „geheimen“ Material sein.

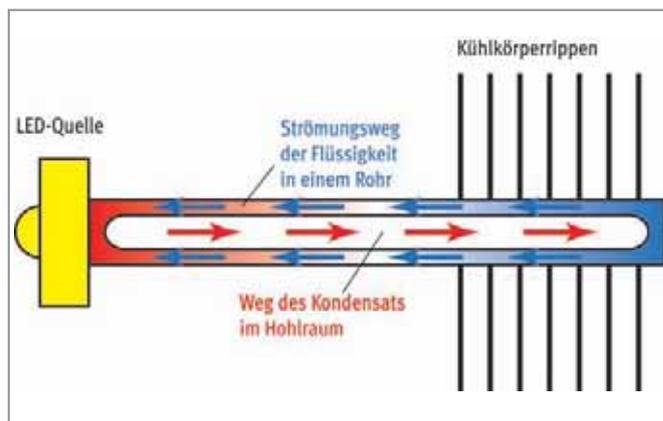
Was immer auch gewählt wird, es ist das Ziel, einen geringen Wärmewiderstand zu erreichen und gleichzeitig ein stabiles Substrat für die elektrischen Verbindungen und die Montage des Gehäuses zu haben. Das Wärmeabflussproblem endet damit aber nicht. Die Wärme muss auch von der Leiterplatte weg geführt werden, meist erfolgt das über einen angeschlossenen Kühlkörper.

Es sind weitere Innovationen zum Lösen des Hitzeproblems nötig. Schließlich muss die Wärme so weit wie möglich von der LED weg geleitet werden. Der einfachste Weg dazu wären Ventilatoren. Aber sie sind ein sogenanntes Anathema in der Industrie (Anathema ist das absolut richtige Wort dafür – es ist definiert als „eine Person oder Sache, die verflucht oder verdammt oder destruktiv“ ist, was wohl sehr genau die Reaktion vieler Leuchten-Entwickler zu den lärmenden Ventilatoren zum Ausdruck bringt).

Das heißt, dass man entweder große passive Kühlkörper oder die deutlich leisere Methode des aktiven Kühlens wählt. Eine Reihe von Herstellern hat mit Peltier-Kühlsystemen experimentiert. Dabei handelt es sich um Halbleiter-Wärmepumpen, während andere sich nach einer Heatpipe (Wärmerohr) umgeschaut haben, wie sie zum Beispiel in vielen Computern zur Prozessorkühlung verwendet werden.

Bild 7 zeigt das Grundprinzip eines solchen Wärmerohrs – es handelt sich um exakt

Bild 7. Wärmerohr



das gleiche Prinzip wie es in einem Kühlschrank oder einer Klimaanlage zur Anwendung kommt, bei der eine leicht flüchtige Flüssigkeit durch die Umgebungswärme verdampft wird. Die im Dampf abgeleitete bzw. mitgeführte Wärme gelangt so an einen Ort, an dem die Wärme wieder abgegeben wird und der Dampf zur Flüssigkeit kondensiert. Im Falle eines Wärmerohrs ist weder eine Pumpe noch ein Kompressor erforderlich, um die Flüssigkeit zu transportieren.

Es wird der Kapillareffekt genutzt, wie er in einem engen Rohr auftritt, um die Flüssigkeit zu transportieren. Die Wärme kommt von der Kühlschlange des Kühlkörpers und wird über den verdunstenden Dampf zum großen Kühlkörper geleitet. Dort kondensiert er wieder zur Flüssigkeit. Sicherlich werden in diesem Bereich künftig viele weitere innovative Entwicklungen zu erwarten sein.

Wieso richtet man aber so viel Aufmerksamkeit auf das Wärmeproblem? Wenn eine Glüh- oder Entladungslampe sehr stark überhitzt wird, ist das Ergebnis normalerweise eine verkürzte Lebensdauer. Aber der Effekt zu hoher Erwärmung in einer LED kann sehr viel subtiler und heimtückischer sein. Zwar verkürzt sich auch ihre Lebensdauer mit steigender Temperatur, da aber die Quantenausbeute von LEDs ebenfalls temperaturabhängig ist, sinkt ihre Ausgangsleistung bei einem Temperaturanstieg.

Dieser Leistungsverlusteffekt ist bei blauen und grünen LEDs relativ klein, kann aber bei amber- und rotleuchtenden LEDs beträchtlich sein. Eine amberfarbene LED kann zum Beispiel relativ leicht 50 % oder mehr von ihrer ursprünglichen Ausgangsleistung verlieren, wenn sich ihre Betriebstemperatur von Zimmerwärme auf etwa 80 °C erhöht.

Und um das Problem noch zu vergrößern, ändert sich die Farbe der LED mit steigender Temperatur. Wie eingangs ausgeführt, ist die

Wellenlänge des emittierten Lichts bei einer LED abhängig von der Breite der Energiebandlücke, die die Elektronen überwinden müssen. Die Breite dieser Bandlücke wird durch die Temperatur beeinflusst, sie verringert sich, wenn die Temperatur steigt. Diese Schrumpfung bedeutet, dass die emittierte Energie der die Lücke durchdringenden Elektronen ebenfalls abnimmt. Das Ergebnis ist eine geringere Energieleistung oder eine Verschiebung der Lichtfarbe zum Roten hin.

Es scheint so, als ob jeden Tag ein Hersteller eine neue Methode entwickelt, um den LED-Chip so im Gehäuse anzuordnen, dass der Wärmetransfer verbessert wird. Das kann über das eingesetzte Material erfolgen oder durch die Art, wie der Chip geformt ist – oder mit einer anderen Methode der Verbindung des Chips auf dem Substrat oder mit irgendeinem anderen Kniff aus Tausenden von Möglichkeiten. Egal, welche Methode angewendet wird, das Ergebnis lautet: *Je mehr Wärme vom Gehäuse abgeleitet wird, desto höher kann die Eingangsleistung sein.*

Lichtauskoppelung

Wie bereits erwähnt, wird das Licht in einer LED nicht auf der Oberfläche des LED-Chips erzeugt, sondern es wird aus einem Bereich emittiert, der zwischen der P- und N-Schicht liegt und als Übergang bezeichnet wird. Das ist recht unbequem, da sich der Übergang genau in der Mitte des Chips befindet.

Wie kommt das Licht aber aus dieser Übergangsschicht heraus? Zumindest eine der Schichten, aus denen der Halbleiter besteht, muss transparent für das Licht sein, das von der LED erzeugt werden soll. Wäre das nicht der Fall, hätte man nur einen sehr kleinen Heizkörper aber keine Lichtquelle.

Das klingt eigentlich nicht sehr schwierig, tatsächlich gelangt aber nur ein sehr kleiner Prozentsatz des erzeugten Lichts aus dem



Bild 8. Beispiel für eine Totalreflexion unter Wasser

Chip. Der Grund dafür – und damit das Problem – ist auftretende Totalreflexion im Inneren des Halbleiters.

Totalreflexion

Totalreflexion kann auftreten, wenn Licht von einem Medium mit hohem Brechungsindex in ein Medium mit einem niedrigen Brechungsindex eintritt, zum Beispiel an den Grenzflächen zwischen Glas zu Luft oder Wasser zu Luft.

Trifft das Licht an der Grenzfläche zweier Medien im rechten Winkel auf, so wird es gerade abgelenkt und man sieht keinen Effekt. Wenn der Winkel zwischen dem Lichtstrahl und der Grenzfläche größer wird, so wird der Lichtstrahl durch die Brechung mit zunehmend größer werdendem Winkel so lange abgelenkt, bis er parallel zur Grenzfläche verläuft. Nimmt der Winkel noch weiter zu, so wird das Licht an der Grenzfläche reflektiert, als ob es ein Spiegel wäre. Ein sehr bekanntes Beispiel des Effekts ist beim Schnorcheln oder Gerätetauchen zu beobachten, wenn man nach unten oder nach oben schaut (**Bild 8**).

Die Unterwasseraufnahme zeigt einen Blick nach oben auf eine Meeresschildkröte. Gleichzeitig erkennt man ihr Reflexionsbild an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft, bedingt durch die Totalreflexion. Wäre die Wasseroberfläche absolut ruhig, ergäbe sich eine perfekte Spiegelwirkung. Totalreflexion ist sehr wirkungsvoll und bei sauberen, flachen Oberflächen kann man bis zu 100 % Reflexion erwarten.

In der Optik kann das manchmal von Vorteil sein. Zum Beispiel wird das Licht in einer Glasfaser durch Totalreflexion abgelenkt und tritt nicht, wie anderenfalls zu erwarten wäre, seitlich aus der Faser aus. Die Totalreflexion transportiert das Licht durch ständiges Hin- und Herreflektieren innerhalb der Faser weiter. Objektive mit Totalreflexion, sogenannte TIR-Linsen (total inner reflection) werden sehr häufig als externe Objektive in High-Power-LEDs verwendet. Ihre hohe Effizienz und das Nichtauftreten von chromatischen Aberrationen machen sie perfekt für diese Aufgabe.

Zurück zu den LEDs. Wie kann die Totalreflexion den Lichtaustritt aus dem LED-Chip verhindern?

Bild 9 zeigt einen hypothetischen LED-

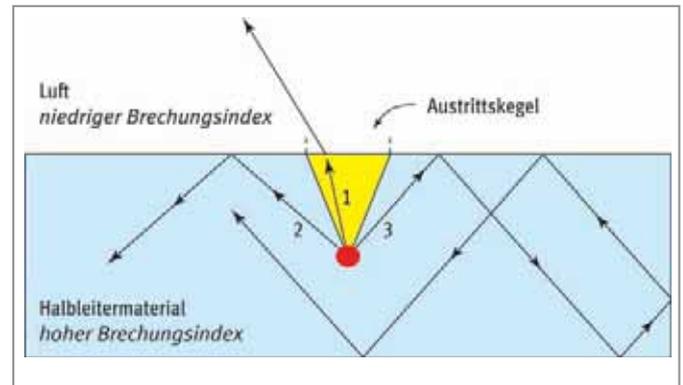


Bild 9. Totalreflexion in einem rechteckigen LED-Chip

Chip, der sehr einfach als Rechteckblock dargestellt wurde. Der P-N-Übergang geht horizontal durch die Mitte und seine obere, lichtabstrahlende Fläche liegt in Richtung Luft. Im Bild stellt der rote Punkt den emittierenden Bereich im Übergang dar (in Wirklichkeit ist es aber kein einzelner Punkt sondern eine Fläche, aber das vereinfacht die Erklärung).

Betrachtet man den Lichtstrahl 1, so ist zu erkennen, dass sein Austrittswinkel aus dem Grenzbereich zwischen dem Halbleitermaterial mit hohem Brechungsindex und der Luft mit einem niedrigen Brechungsindex ziemlich nahe beim senkrechten Auftreffen liegt und er deshalb den Grenzbereich durchtritt – wie bei einer normalen Linse üblich. Dieser Lichtstrahl ist verwendbar.

Wird der Winkel indessen größer, so erreicht er ziemlich bald den Wert, an dem kein Licht nach außen dringt, sondern durch die Totalreflexion in den Halbleiter (zu)rückreflektiert bzw. gespiegelt wird. Lichtstrahl 2 ist ein Beispiel dafür, während Lichtstrahl 3 aufzeigt, dass ein Lichtstrahl, der total reflektiert wird, in dem rechteckigen Block auch nach Mehrfachreflexion nicht nach außen gelangt. Er wird an jeder Grenzoberfläche total



NEW!
1100 SERIES
INTERCOM
PANEL

ARTIST DIGITAL MATRIX INTERCOM

The Solution for World Class Events.

WUPPERTAL | BEIJING | BERLIN | GLENDALE | LONDON | SINGAPORE | SYDNEY | VIENNA | ZURICH
www.riedel.net

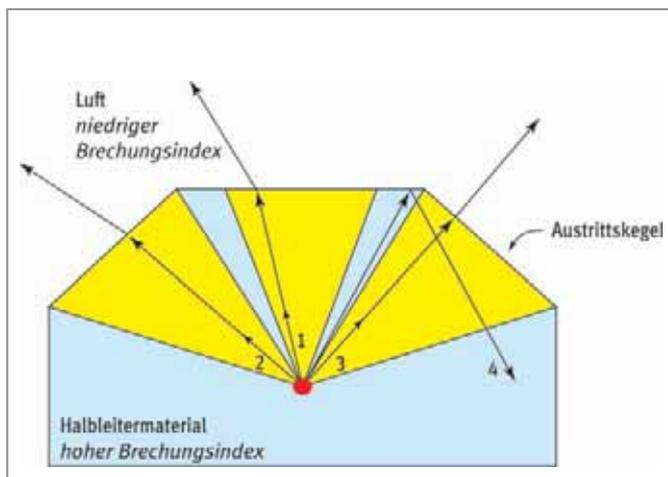


Bild 10. Totalreflexion in einem rechteckigen LED-Chip

reflektiert und deshalb wie bei einer Lichtleitfaser gewissermaßen ständig hin und her reflektiert.

Der gelbe Bereich zeigt den kleinen Winkel, in dem der Lichtstrahl durch die Grenzfläche nach außen treten kann. Dreidimensional gesehen ist dieser Bereich konisch und wird oft mit „Escape Cone“ (Austrittskegel) bezeichnet. Er ist in der Realität extrem klein: GaA-Material (häufig in roten LEDs benutzt) hat einen Brechungsindex von 3,4 und der Austrittskegel hat einen Halbwinkel von nur $17,1^\circ$: Das bedeutet, dass nur ein klein wenig mehr als 2 % des erzeugten Lichts austreten kann. GaN-Materialien (blaue und grüne LEDs) haben einen Brechungsindex von 2,5 und der Halbwinkel des Austrittskegels ist $23,6^\circ$. Das ist gleichzusetzen mit etwas mehr als 4 % Wirkungsgrad.

LEDs der ersten Generation, wie sie für Displays und Anzeigeelemente benutzt wurden, hatten ähnlich geringe Ausgangsleistung.

gen. Deshalb war die Lösung des Problems der Totalreflexion ein wesentliches Ziel der Verbesserung, um sie jemals als Lichtquelle für Beleuchtungszwecke einsetzen zu können. Alle Arbeit, die man in die Verbesserung der Effizienz der Chemie der LED stecken würde, wäre reine Zeitverschwendung, wenn letztendlich nur 2 % des erzeugten Lichts genutzt werden könnten. Doch lässt sich das Resultat wesentlich verbessern, wenn man die Form und die Anordnung mit neuerer Technik optimiert.

Bild 10 zeigt eine solch große Verbesserung, die allein schon dadurch erreicht wird, dass man die oberen Kanten des rechteckigen Chips abschneidet. Nun ist jede Kante auf der Frontseite so gewinkelt, dass das Licht in einem fast normalen Winkel auf die Grenzfläche zur Luft auftrifft, und zum Beispiel der Lichtstrahl 2 sowie 3 im Bild 9 nicht durch die Totalreflexion absorbiert werden, sondern ebenfalls austreten können.

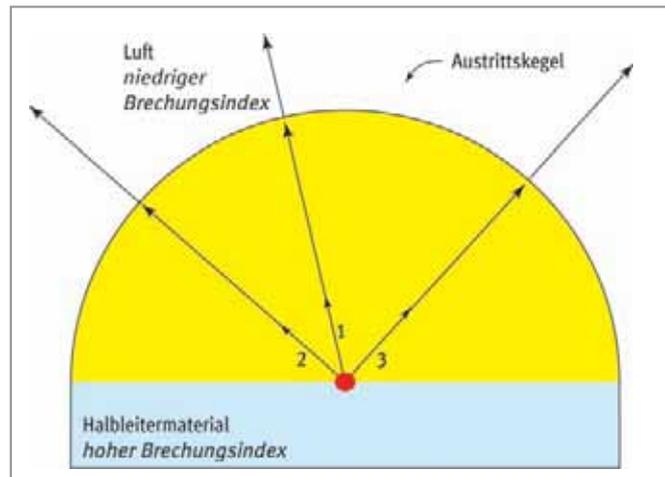


Bild 11. Totalreflexion in einem LCD-Chip mit hemisphärischer Front

Durch die sich aus dieser Anordnung ergebenden mehrfachen Austrittszonen wird der Wirkungsgrad deutlich verbessert. Eine einfache Trapezform, wie dargestellt, ist zwar nicht perfekt, doch jetzt unterliegt nur noch der Lichtstrahl 4 der Totalreflexion und ist für die Ausstrahlung nicht relevant. Es ist recht kompliziert solch eine Chipform zu fertigen, doch lässt sich die Wirkung darüber hinausgehend verbessern, wenn man die Kanten wieder und wieder abschneidet, bis letztendlich eine hemisphärische (halbkugelförmige) Form erreicht wird (**Bild 11**).

Nun wird das gesamte emittierte Licht nach oben auf die Grenzfläche in einem normalen Winkel auftreffen, ohne dass Totalreflexion auftritt. Leider ist die Herstellung solcher Chips mit hemisphärischer Form extrem schwierig und teuer. Denn die Herstellung von Halbleitern ist im Wesentlichen eine Art Laminierprozess, in dem eine ganze Reihe von flachen Einzelschichten übereinander aufgebracht oder teilweise durch Ätzprozesse entfernt werden, ohne dass dabei dreidimensionale Formen möglich wären. Doch es gibt eine Lösung.

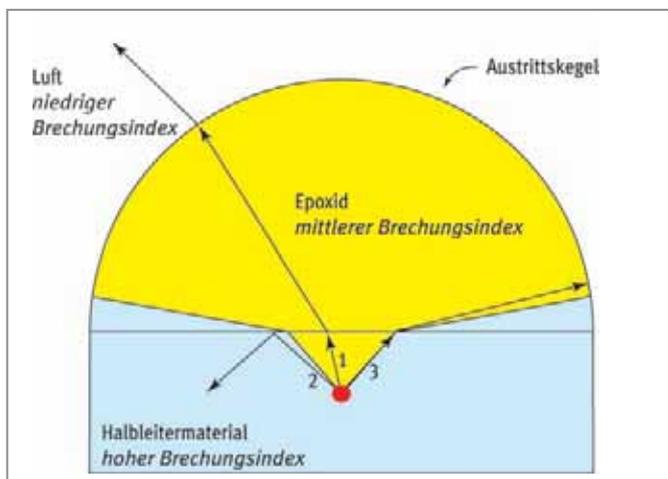


Bild 12. Totalreflexion bei einem LED-Chip mit Epoxid-Verkapselung

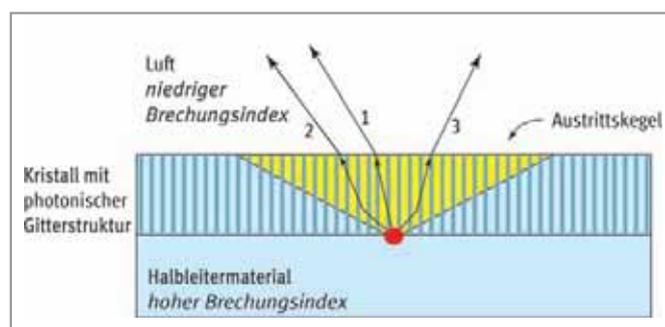


Bild 13. Chip-Struktur bei einer LED mit photonischen Kristallgittern (photonic lattices)

Verkapselung (Encapsulation)

LED-Chips werden meist durch eine transparente Epoxid- und Silizium-Schicht auf ihrer Oberseite bedeckt. Sie wird einerseits für den Schutz des Chips eingesetzt und hilft andererseits, die Totalreflexion zu verringern.

Bild 12 zeigt den gleichen rechteckigen LED-Chip wie im Bild 5, nun aber mit einer hemisphärischen (halbkugeligen) Kapselung aus Epoxid auf der Vorderseite. Diese Verkapselung hat einen Brechungsindex, der zwischen dem des Halbleiters und der ihn umgebenden Luft liegt. Obwohl die Anzahl an Grenzflächen nun von einer auf zwei steigt, ist der jeweilige Unterschied des Brechungsindex gegenüber der umgebenden Grenzfläche geringer, und es ergibt sich ein größerer Austrittskegel. Das ist besonders hilfreich an der Grenzfläche zwischen dem Halbleiter und dem Verkapselungsmaterial. Eine einfache Verkapselung, wie im Bild 12 dargestellt, kann den Grad der Lichtauskoppelung um den Faktor 2 erhöhen, bringt also eine Wirkungsgradverbesserung von 2 % auf 4 %. Das ist zwar nicht besonders viel, aber die Methode ist preiswert und für viele Anwendungen der LEDs ausreichend.

LED-Hersteller haben beträchtliche Gelder in Forschung und Entwicklung gesteckt, um die Lichtauskoppelung zu verbessern. Es gab deutliche Leistungssteigerungen in den letzten Jahren, die zu den heutigen High-Power-LEDs geführt haben. Unterschiedliche Formen und Größen von LED-Chips, unterschiedliche Oberflächenbehandlungen mit Diffraction (Beugung) ebenso wie Refraktion (Brechung), Entspiegelungsbeschichtungen und unterschiedlichen Verkapselungen haben des Weiteren zur Verbesserung beigetragen.

Es gibt auch Chips in Form umgekehrter Kegelstümpfe, manchmal als Flip-Chips oder anderen seltsamen Namen bezeichnet. Alle Hilfsmittel und Lösungsansätze werden zur Verbesserung der Lichtauskoppelung eingesetzt.

Photonische Kristallgitter (Photonic lattices)

Eine der kommenden Verbesserungen in der Lichtauskoppelung wird durch die Einbeziehung photonischer Kristallgitter (photonic lattices) direkt auf der Vorderseite des Übergangs erreicht werden.

Diese Idee hatte erstmals Eli Yablonovitch im Jahr 1987. Er ist heute an der Universität von Kalifornien in Berkeley tätig. Er leitete weltweit umfangreiche Versuche ein und initiierte eine Erweiterung dieses Forschungsbereichs. Die Methoden für die Herstellung und präzise Bearbeitung eines Kristalls grenzen fast schon an das Unvorstellbare, aber das Ergebnis sind lange, dünne, kristalline Anordnungen, die in das Halbleitermaterial eingebettet werden, die in einem gewissen Grad als diffraktive, also das Licht beugende Wellenleiter wirken und die Lichtauskoppelung durch Umleiten und Lichtbrechung aus dem Halbleiter vergrößern.

Bild 13 zeigt eine sehr vereinfachte Darstellung dieser Anordnung. Die photonischen Kristallgitter im unteren Teil des Halbleiter-Sandwich tendieren dazu, das Licht entlang ihrer Länge umzuleiten und es sehr viel näher an die Grenzfläche „Halbleiter/Luft“ heranzubringen als es normalerweise möglich wäre. Totalreflexion zurück in das Halbleitermaterial wird so verhindert.

Die neuesten Produktentwicklungen in

Erweiterung der Projektoren-Serie

Panasonic hat seine Projektoren-Serie um die portablen Modelle PT-LB1E und PT-LB2E erweitert. Beide sind mit Funktionen für Autosignal und Formatsuche ausgestattet und bieten verschiedene Anschlussmöglichkeiten, XGA-Auflösung (1024×768 Pixel) sowie ein Kontrastverhältnis von 500:1 bei einer Helligkeit von 2200 (LB1) beziehungsweise 2600 Lumen (LB2).

Die 2,3 Kilogramm schweren Einsteigergeräte basieren auf der Daylight-View-Technologie: Sie messen das Umgebungslicht über einen Sensor und passen die Bildhelligkeit automatisch an die Lichtverhältnisse an. Durch die Plug-&-Play-Funktionalität und die RS-232C-Protokoll-Emulation lassen sich die Projektoren in bestehende Infrastrukturen integrieren.

www.panasonic.net

dieser Technologie sind die von Luminus Devices und die Philips Lumileds, die einen Wirkungsgrad bei der Lichtauskoppelung von über 70 % bieten – ausgehend von den genannten 2 %, mit denen diese Technik mal gestartet ist.

Schlussbemerkung

Empfehlenswert als weiterführende, sehr detaillierte und ins Einzelne gehende Lektüre, allerdings auf einem sehr hohem technischen Niveau, ist das Buch „Light-Emitting Diodes“ von E. Fred Schubert (Cambridge University Press, 2. Ausgabe).


The Communications People

NEW!
MULTI I/O
BREAKOUT
PANEL

MEDIORNET FIBER-OPTIC NETWORKS

The Solution for World Class Events.

WUPPERTAL | BEIJING | BERLIN | GLENDALE | LONDON | SINGAPORE | SYDNEY | VIENNA | ZURICH
www.riedel.net