

## Das kalte Licht

*Leuchtdioden bewähren sich nicht mehr nur als „kleine Lichter“, sondern auch als effizientere Alternative zu herkömmlichen Glühlampen.*

Ein bekanntes Ärgernis: Man ist des Nachts auf dem Drahtesel unterwegs und der Dynamo surrt fröhlich vor sich hin, dann ein kurzes Auf-flackern und schon wieder ist das Birnchen durchgebrannt. Für viele Radler ist das allerdings Schnee von gestern, denn ihr Untersatz ist mit Leuchtdioden (LEDs) bestückt, und die halten bedeutend länger. Doch nicht nur in Fahrradscheinwerfern,



**Abb. 1:** Dass LEDs nicht nur als Fahrrad-leuchte taugen, zeigt das farben-prächtige Licht-spiel der Fassade des Parkhotels im schweizerischen Weggis. (Quelle: Osram)

auch in Taschenlampen, Ampeln, Autoscheinwerfern, Innenraum- oder sogar Fassadenbeleuchtungen (Abb. 1) haben die kleinen robusten Strahler inzwischen Einzug gehalten. Kurz: Glühlampen sind out, Leuchtdioden in. Nicht zuletzt weil Glühlampen wahre Energieverschwender sind, sie verheizen 95 % ihrer Energie und leuchten ziemlich ineffizient nur mit dem kümmerlichen Rest. Ganz anders dagegen die Leuchtdioden, welche die Beleuchtungstechnik revolutionieren und weltweit Stromkosten im Milliardenbereich einsparen helfen sollen.

### Strom rein, Licht raus

Wie in vielen optoelektronischen Bauteilen, etwa einer Solarzelle<sup>1)</sup>, steckt auch in einer LED ein Halbleiterkristall. Man könnte grob sagen, die LED ist die Umkehrung der Solarzelle. Bei Letzterer steckt man Licht hinein, um Strom heraus zu bekommen, bei der LED erzeugt man mithilfe von Strom Licht. Leuchtdioden gehören also zur Gruppe der Elektrolumineszenzstrahler. Der Halbleiterkristall besteht aus zwei Schichten, von denen eine derart mit Fremdatomen dotiert wird, dass ein Überschuss an Elektronen entsteht (n-Schicht).

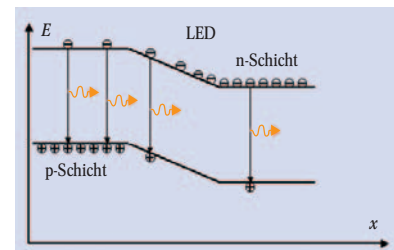
In der anderen Schicht entsteht durch zusätzliche Atome hingegen ein Elektronenmangel, also ein Überschuss an positiv geladenen Löchern (p-Schicht). Die Eigenschaften des Halbleiters hängen nun entscheidend davon ab, was am Übergang zwischen beiden Schichten, dem sog. pn-Übergang, passiert. Schließt man an die beiden Schichten eine Spannungsquelle an, und zwar mit dem Minuspol an die n-Schicht und dem Pluspol an die p-Schicht, dann wandern die Elektronen in Richtung Pluspol und stoßen im Übergangsbereich auf die ihnen entgegenkommenden positiven Löcher (Abb. 2). Beide Ladungsträger rekombinieren entweder miteinander oder mit den Donatoren bzw. Akzeptoren und setzen dabei elektromagnetische Strahlung frei: Der Halbleiter fängt an zu leuchten. Die Wellenlänge des Lichts hängt von der Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband ab, die die Elektronen bei der Rekombination überbrücken, also von Halbleitermaterial und Dotierung.

Bei Halbleitern unterscheidet man zwischen solchen, die nur aus einem Element bestehen (etwa Silizium oder Germanium), und Verbindungshalbleitern. Für Leuchtdioden werden hauptsächlich III-V-Halbleiter verwendet, bei denen ein Element aus der dritten und eins aus der fünften Hauptgruppe des Periodensystems kombiniert wird, z. B. Galliumphosphid (GaP), Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) oder Indiumgalliumnitrid (InGaN).

### Frühe Entdeckung ...

Vielleicht wäre die Glühlampe nie so erfolgreich geworden, wenn H. J. Round, der bereits 1907 die Elektrolumineszenz an einem Siliziumkarbid-Kristall beobachtete, im Detail verstanden hätte, was er da sah. Es war zwar schon klar, dass dort kaltes Licht beobachtet wurde, weil der Kristall sich nicht erwärmte, doch da Round und seine Kollegen damals den Kristall lediglich zur Detektion von Radiowellen brauchten, kam ihnen die Entwicklung einer Lichtquelle nicht in den Sinn. Erst O. V. Lossev untersuchte das Leuchtphänomen Ende der 1920er-Jahre erneut, um seine Verwendbarkeit in der Nachrichtenübertragung auszuloten. Doch weitere Jahrzehnte vergingen, bis es im Rahmen der Festkörperphysik 1951 gelang, die Elektrolumineszenz zu erklären, wodurch deren

Anwendungen erneut ins Blickfeld rückten. Zunächst experimentierte man noch erfolglos mit Zinksulfid, bis die III-V-Verbindungen und ihre Eignung für die Lichtemission im Sichtbaren entdeckt wurden. Anfang der 60er-Jahre kam die LED-Entwicklung dann richtig in die Gänge. 1962 bot General Electric die erste aus GaAsP aufgebaute rote Leuchtdiode an, damals noch mit einer bescheidenen Ausbeute.



**Abb. 2:** Rekombination von Elektronen und Löchern in einer in Durchlassrichtung betriebenen Leuchtdiode.

### ... späte Anwendung

In den kommenden Jahrzehnten wurde der Wirkungsgrad durch neue Halbleitermaterialien ständig verbessert; in den frühen 80er-Jahren ermöglichten Leuchtdioden eine effektivere Lichterzeugung als entsprechende farbefilterte Glühlampen und kamen in Signalanlagen und Anzeigetafeln zum Einsatz.

In den 90er-Jahren stellte sich AlInGaP als besonders geeignetes Material für LEDs im rot-orangen, gelben und grünen Spektralbereich heraus. Der blaue Spektralbereich erwies sich als hartnäckiger, doch 1993 mixte Shuji Nakamura die erste Materialkombination (InGaN), die leuchtend blaues Licht emittierte, und entwarf neue hocheffektive Leuchtdioden und Laser, wodurch er zu einem Technologie-Star wurde.

LEDs gibt es inzwischen in den unterschiedlichsten Bauformen und in vielen Leistungsstufen – von den vertrauten, wenigen Millimeter großen Lämpchen, die mit 20 mA betrieben werden, bis zu speziellen Leuchtkörpern, die von 350 mA gespeist werden und mehrere Watt Lichtleistung abgeben und es mit Halogen- und anderen Fluoreszenz-lampen aufnehmen können. Allerdings darf die Stromstärke nicht zu groß werden, weil dann auch die Temperatur des Halbleiters steigt, was wiederum die Leitfähigkeit erhöht und somit die Stromstärke weiter steigen lässt. Ab einer bestimmten Temperatur kann dann die Gitterstruktur des Halbleiters zer-

<sup>1)</sup> vgl. Physik Journal, April 2003, S. 54

stört werden. Leistungsstarke LEDs sollten also einen Vorwiderstand zur Begrenzung der Stromstärke haben und eine gute Wärmeabführung.

Was die Lichterzeugung angeht, sind Leuchtdioden auf jeden Fall unschlagbar in punkto Wirkungsgrad: Die Quanteneffizienz des internen Lumineszenzeffekts liegt nahe bei Eins, d. h. aus praktisch jedem Elektron-Loch-Paar entsteht ein Photon. Allerdings muss das Licht ja raus aus dem Halbleiter, und diese Auskopplung reduziert den gesamten Quantenwirkungsgrad als Verhältnis von abgestrahlter zu aufgenommener elektrischer Leistung erheblich. Zum einen werden die in der Sperrschicht erzeugten Photonen absorbiert (weshalb man bestrebt ist, die Halbleiterschichten möglichst dünn und transparent zu machen), zum anderen tritt beim Übergang vom Halbleiter in die Luft wegen der unterschiedlichen Brechungsindizes Totalreflexion auf, so dass viele Photonen die LED nicht verlassen. Verbesserung bringen hier Abdeckungen aus Epoxydharz, die den Winkel, unter dem Photonen noch austreten können, erhöhen.

Wie hell aber eine Leuchtdiode letztendlich wahrgenommen wird, beschreibt auch der Quantenwirkungsgrad noch nicht vollständig, denn die Helligkeitswahrnehmung



**Abb. 3:** Mittlerweile gibt es auch Leuchtdioden, die weißes Licht abstrahlen (Quelle: Osram).

(gemessen in Lumen [lm]) hängt von der Wellenlänge ab und ist bei einer grünen LED stärker als bei einer roten. Der theoretisch optimale Gesamtwirkungsgrad für eine monochromatische Leuchtdiode von 683 lm/W wird bei einer Wellenlänge von 555 nm erreicht. In den nächsten Jahren hofft man, den Leuchtwirkungsgrad in der Praxis auf 300 lm/W hochtreiben zu können – dann wäre die LED in der Tat

allen anderen bekannten Lampen überlegen.

### Weißes Licht mit LEDs

Bis in die 1990er-Jahre hinein waren nur mehr oder weniger monochromatische Leuchtdioden verfügbar, doch die Einführung einer blauen LED mit ausreichender Intensität machte es möglich, auch weißes Licht zu produzieren (Abb. 3). Nach wie vor leuchten einzelne LEDs nur in einem schmalen Spektralbereich, doch die Kombination aus einer roten, grünen und blauen LED führt zu einer weißen Lichtmischung bzw. – je nach Anteil der drei Farbkomponenten – zu jeder beliebigen Mischfarbe. Das Problem dieser Mischtechnik besteht allerdings darin, dass verschiedenfarbige LEDs auch verschieden altern und deshalb ihre ursprüngliche Farbe verlieren können. Zwar kann man mittels ausgeklügelter elektronischer Schaltungen und Sensoren dafür sorgen, dass eine einzelne nachlassende LED stärker betrieben wird, um die Farbe stabil zu halten, doch das macht die Sache auch teurer. Viele Firmen versuchen deshalb, die Elektronikkosten zu minimieren und die Alterung zu verlangsamen.

Eine andere Möglichkeit, weißes Licht herzustellen, besteht darin, eine monochromatische LED, beispielsweise eine ultraviolette, mit zusätzlichen Leuchtstoffen anzureichern, die die ultraviolette Strahlung absorbieren und dann selbst ein breiteres Spektrum abstrahlen. Richtig kombiniert, erzeugen diese Leuchtstoffe dann weißes Licht. Nachteil dieser Methode: Die Leuchtstoffe reduzieren den Wirkungsgrad durch den zusätzlichen Umwandlungsschritt von ultraviolett zu weiß. Doch intensive Entwicklungsarbeit an den Leuchtstoffen hat deren Fähigkeit, Energie zu absorbieren, massiv gesteigert, sodass weiße LEDs mit einer Lichtausbeute von 30 lm/W kurz vor der Marktreife stehen und damit Glühbirnen um den Faktor 2 übertreffen – bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 50000 Stunden. Das jetzt schon realisierte und erst recht das zukünftige Sparpotenzial der Leuchtdioden, vor allem der weißen, ist also enorm. Sie werden die konventionelle Lichttechnik vermutlich früher oder später ablösen.

ULRICH KILIAN