

LED – Die magische Lichtquelle

Leuchtdioden sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Die Grundlagen wurden bereits in den 1920er-Jahren mit der Quantentheorie gelegt. Inzwischen ist es auch möglich, weisses Licht mit LEDs zu erzeugen.

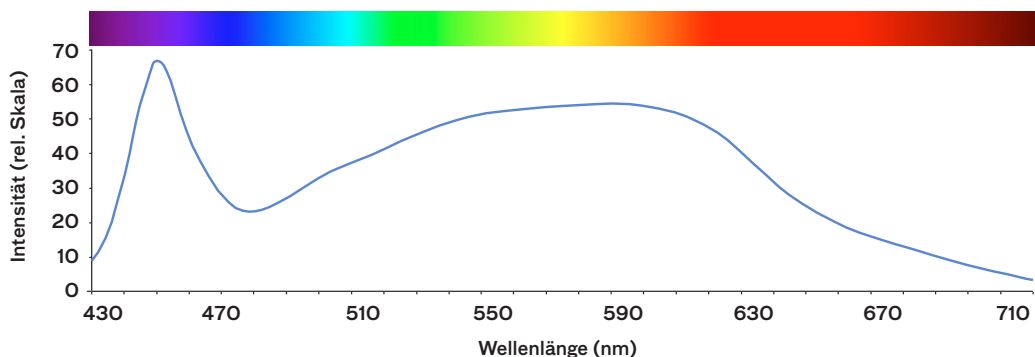
Seine Kollegen taufte die Erfindung «*The Magic One*», als ihnen Nick Holonyak im Herbst 1962 im General Electric Forschungszentrum in New York eine rot leuchtende Diode zeigte. Heute treffen wir LEDs (LED = Light Emitting Diode, Leuchtdiode) buchstäblich überall an: als farbige Leuchtpunkte und als Hintergrundbeleuchtung von Displays im Auto, in Handys, Smartphones, TV-Geräten, PCs, Tablets, Radios oder als energiesparende Leuchten in Wohnzimmern, Büros und Strassenlampen. Und täglich kommen neue Anwendungen hinzu.

Elektrische Eigenschaften verstehen

Um die Funktionsweise einer LED zu verstehen, muss man die Grundlagen der Halbleitertechnologie kennen. Mit der Entwicklung der Quantentheorie in den 1920er-Jahren wurden die chemischen Eigenschaften der Atome berechenbar. Die Physiker konnten damit auch die elektrischen Eigenschaften der Festkörper verstehen und die drei Gruppen Isolatoren, Halbleiter und Leiter wurden als Spezialfälle eines allgemeineren Phänomens erkannt.

Mit der Quantentheorie lässt sich berechnen, wie sich ein zusätzliches Elektron in einem absolut reinen und perfekten Kristall bewegt. Es hüpfte mit konstanten Sprüngen widerstandsfrei über eine bestimmte Anzahl Atome hinweg, ähnlich wie wir über ein Feld mit regelmässig angeordneten Steinen von Stein zu Stein springen könnten. Je mehr Steine wir überspringen, desto schneller bewegen wir uns. Analog braucht das Elektron für jeden Sprungmodus eine bestimmte kinetische Energie. Es muss sich also in einem bestimmten Energieband, dem sog. Leitungsband befinden. Alle übrigen Elektronen sind an die Atomkerne gebunden und besetzen ein tiefer liegendes Valenzband. Liegt das Leitungsband in einem Kristall weit über dem Valenzband, schaffen es keine Elektronen ins Leitungsband und der Kristall ist ein Isolator. Handelt es sich um einen Leiter, überlappen sich das Valenz- und das Leitungsband, so dass sich die energiereichsten Elektronen des Valenzbandes im Leitungsband frei bewegen können. Bei einem Halbleiter schliesslich liegt das Leitungsband nur knapp über dem Valenzband. Elektronen können mit ein wenig Zusatzenergie die Bandlücke überspringen und ins Leitungsband gelangen.

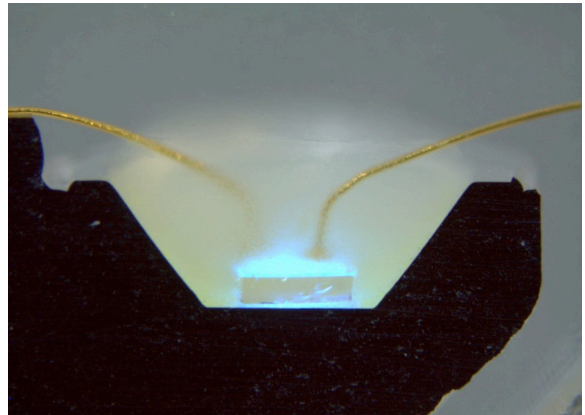
Als Halbleitermaterial wird heute für integrierte Schaltkreise meistens Silizium (Si) verwendet, da damit sehr reine und fehlerfreie Kristalle hergestellt werden können. Durch eine winzige Verunreinigung des Siliziums mit Arsen (As) werden über-



Spektrum einer weissen LED: Das kontinuierliche Spektrum mit einem breiten Maximum bei 590 Nanometer entsteht durch die Phosphor-Photolumineszenz. Diese wird durch das blaue LED-Licht mit einer Wellenlänge von 450 Nanometern angeregt.



Weisse LED Raumleuchte von Osram. Gut erkennbar ist die gelbe Phosphorschicht, mit der das blaue LED-Licht in weisses transformiert wird.



Eine weisse LED in Betrieb. Das blaue LED-Primärlicht vermischt sich mit dem Photolumineszenzlicht der Phosphorschicht.

zählige Elektronen ins Siliziumgitter eingebaut, weil Arsen im Gegensatz zum vierwertigen Silizium fünfwertig ist. Man nennt diese gewollte Verunreinigung «Dotierung» und bezeichnet Arsen als Donator, weil es das fünfte Elektron leicht abgibt. Viele dieser Donator-Elektronen werden im negativ dotierten Silizium (n-Dotierung) durch die thermische Bewegung ins Leitungsband befördert, so dass sich eine gewisse Leitfähigkeit einstellt.

Zweifache Dotierung

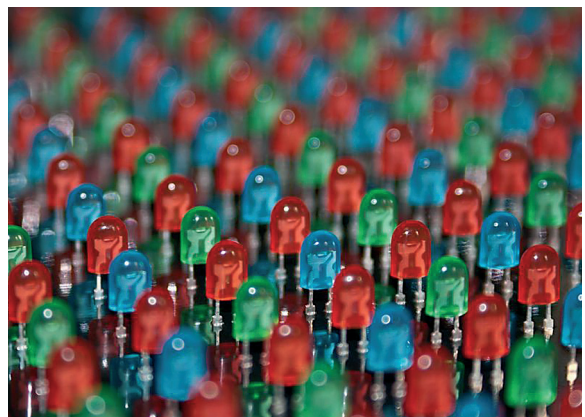
Dieser Vorgang lässt sich spiegeln: Die p-Dotierung mit dreiwertigem Aluminium als Akzeptor erzeugt fehlende Elektronen oder Löcher, die sich wie positive Ladungen verhalten und ein Löcher-Leitungsband besetzen. Wird ein Halbleiter von der einen Seite her p-dotiert, von der anderen n-dotiert, ergibt sich eine schmale pn-Übergangszone, in der sich Löcher (positiv) und Elektronen (negativ) der entsprechenden Leitungsbander anziehen und rekombinieren: Es fließen Elektronen von der negativ zur positiv dotierten Seite.

Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, das den Vorgang nach kurzer Zeit stoppt. Durch Anlegen einer äusseren Spannung kann der Rekombinationsprozess jedoch am Laufen gehalten werden, so dass Elektronen und Löcher kontinuierlich rekombinieren. Dabei wird Energie freigesetzt, die als Licht emittiert wird: Die LED ist geboren. Je nach dem, welche Materialien verwendet werden, entsteht infrarotes, rotes, gelbes, grünes, blaues oder ultraviolettes Licht.

LEDs erzeugen grundsätzlich reine Farben. Wie erzeugt man nun weisses Licht? Eine nahe-

liegende Möglichkeit ist die additive Mischung von rotem, grünem und blauem Licht, wie dies bei jedem Pixel in Displays (TV, PC, Smartphone, etc.) realisiert wird. Bei heutigen weissen LED-Leuchten wird jedoch meistens ein anderes Verfahren angewandt: Eine blaue Leuchtdiode wird mit einer Phosphorschicht überdeckt. Diese wird durch das blaue Licht angeregt und emittiert dann durch Photolumineszenz ein kontinuierliches Farbspektrum von rot bis blau. Betrachtet man das Spektrum einer weissen LED, ist das Maximum bei Blau deutlich sichtbar. Dieses Maximum bewirkt, dass LED-Licht manchmal als zu kalt empfunden wird. Für Zimmerpflanzen ist genau dies jedoch günstig, weil die starke blaue Komponente die Photosynthese anregt.

Fritz Gassmann



Detailaufnahme eines Displays, das nach dem RGB-Verfahren arbeitet. Wenn alle LEDs hell leuchten, empfinden wir das Licht als weiss. Leuchten nur die roten und grünen LEDs, sehen wir gelbes Licht.