

Leuchtdioden – Theorie und praktische Anwendung

In fast allen elektronischen und elektrischen Geräten kommen heutzutage LEDs zum Einsatz. Durch die rasante Entwicklung in den letzten Jahren erweitert sich ihr Einsatzgebiet ständig. Es reicht dabei vom Einsatz in der Automobilbranche bis hin zu Beleuchtungsaufgaben im Haushalt. Die theoretischen Hintergründe und praktische Tipps zur Anwendung werden in diesem Grundlagenartikel vorgestellt.

Entwicklungsgeschichte

LEDs (light emitting diode = lichtaus-sendende Diode) haben gegenüber konventionellen Lichtquellen viele Vorteile: Sie sind mechanisch unempfindlich, haben einen besseren Wirkungsgrad, arbeiten mit geringen Versorgungsspannungen, besitzen eine hohe Lebensdauer, lassen sich kontinuierlich dimmen usw. Diese Vorteile sorgen dafür, dass der Anteil der LEDs an den lichterzeugenden Quellen immer größer wird. Vor allem aufgrund moderner Chiptechnologien stoßen sie in Bereiche vor, die bisher nur von „normalen“ Leuchtmitteln (Glühlampen oder Gasentladungslampen) abgedeckt wurden.

Die ersten Leuchtdioden, die sichtbares Licht emittierten, kamen Mitte der 60er-Jahre in den Handel. Diese LEDs arbeiteten im roten Spektralbereich und hatten eine nur sehr geringe Lichtausbeute. Nach

und nach wurde dann der Wirkungsgrad verbessert und es kamen im Laufe der 70er-Jahre mit grünen, gelben und orange-farbenen LEDs weitere Varianten hinzu. Schnell wuchs neben der Lichtausbeute auch die Vielfalt an Ausführungen: 7-Segment-, 14- und 16-Segmentanzeigen, Dot-Matrix-Anzeigen usw. entstanden schnell, um die weite Verbreitung in der Elektronik voranzutreiben.

Anfang der 80er-Jahre brachte dann die Entwicklung von roten LEDs auf der Basis von AlGaAs-Material (Aluminium-Gallium-Arsenid) einen großen Fortschritt in der Lichtstärke. Die Entwicklung ist in diesem Bereich rasant. So bringt zur Zeit wohl die Materialkombination AlInGaP (Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid) die größte Helligkeit zustande.

Waren die Standard-LED-Farben Rot, Grün, Gelb und Orange schnell in großen Stückzahlen und mit großen Helligkeiten verfügbar, so dauerte es vergleichsweise

lange, bis LEDs in der Farbe Blau serienreif waren. Erst Mitte der 90er-Jahre kamen diese mit brauchbarer Lichtausbeute auf den Markt. Mit der Entwicklung der blauen LEDs war eine wichtige Grundlage für die weitere Entwicklung der heutigen visuellen Optoelektronik geschaffen: Alle drei Grundfarben Rot, Grün und Blau sind mit ähnlichen Parametern in Lichtstärke und Abstrahlverhalten verfügbar. Dies eröffnet die Möglichkeit des Erzeugens aller sichtbaren Farbtöne mittels additiver Farbmischung. Unter anderem lässt sich so auch das für die Raumlichtgestaltung so wichtige weiße Licht mit Hilfe von LEDs generieren.

In den letzten Jahren lag ein Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung in der Erzeugung von weißem Licht mit einer einzelnen LED. Seit Ende der 90er-Jahre sind diese LEDs dann auch in großen Stückzahlen und zu vertretbaren Preisen verfügbar, wobei das Preisgefälle von den teuren

Tabelle 1: Beispiele für Halbleitermaterialien mit Wellenlänge und Flussspannung

Typ:	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Superhell	Superhell	Superhell	Superhell	Ultrahell	Ultrahell	Ultrahell
Farbe:	Tiefrot	Rot	Orange	Gelb	Grün	Hyper-Rot	Gelb	Grün	Blau	Grün	Blau	Weiß
Halbleitermaterial:	GaP	GaAsP	GaAsP/GaP	GaAsP/GaP	GaP	GaAlAs	AlInGaP	GaP	GaN	GaN	GaN	GaN
Wellenlänge:	700 nm	655 nm	610 nm	585 nm	555 nm	660 nm	595 nm	565 nm	430 nm	525 nm	475 nm	
Nennstrom I_N :	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA	20 mA
Flussspannung ($U_F @ I_F = I_N$):	2,0 V	1,7 V	2,0 V	2,1 V	2,2 V	1,85 V	1,8 V	2,2 V	3,5 V	3,3 V	3,5 V	3,5 V

weißen und blauen LEDs hin zu den preisgünstigen roten, gelben und grünen Typen immer noch sehr groß ist.

Funktionsprinzip

Konventionelle Leuchtmittel erzeugen das sichtbare Licht mit einem Glühprozess (Glühlampe), d. h. als „Abfallprodukt“ einer Erwärmung oder durch das Umwandeln ultravioletter Strahlungsanteile in sichtbares Licht, wie bei den sogenannten Leuchtstofflampen. Das Funktionsprinzip von Leuchtdioden ist demgegenüber recht komplex, daher folgt für den interessierten Leser ein kleiner Exkurs in die Atomphysik.

Eine LED ist im Prinzip eine Halbleiterdiode, die sichtbares Licht emittiert, wenn sie in Durchlassrichtung betrieben wird. Wie bei einer normalen Halbleiterdiode, besteht auch die LED aus einer p- und n-dotierten Halbleiterkristallschicht. Do-

tiertung ist dabei die Bezeichnung für die gezielte Verunreinigung des Halbleitermaterials mit Fremdatomen. Diese eingebrachten Fremdatome erzeugen durch ihren Atomaufbau Bereiche mit Elektronenüberschuss (n-dotierte Zone) und Bereiche mit Elektronenmangel, d. h. mit Löcher- bzw. Defektelektronenüberschuss, (p-dotierte Zone).

Im thermodynamischen Gleichgewicht, d. h. im spannungslosen Ruhezustand, bildet sich im Halbleiterkristall an der Kontaktebene zwischen p- und n-dotierter Zone eine Raumladungszone aus, in der es zu Ausgleichsvorgängen kommt. Diese Raumladungszone enthält keine freien Ladungsträger mehr und stellt so eine gewisse Barriere für das Leiten des elektrischen Stromes dar (Sperrschicht).

Wird eine Spannung angelegt, so kommt es aufgrund der entstehenden Felder zu einer Veränderung der Raumladungszone. Bei einer Spannung in Sperrrichtung ver-

breitert sich die Raumladungszone; es fließt kein Strom (bis auf ein im Allgemeinen zu vernachlässigender Sperrstrom). Die Spannung in Sperrrichtung darf dabei allerdings eine gewisse Höhe nicht überschreiten, da es sonst zu einem Durchbruch kommt, der die Diode zerstört. Diese maximale Sperrspannung ist bei Leuchtdioden mit ca. 5 V relativ gering.

In Flussrichtung sorgt die Spannung dafür, dass sich die Raumladungszone verkleinert. Bis zu einer bestimmten Feldstärke (Spannung) ergibt sich hierbei jedoch noch kein nennenswerter Strom. Ab der sogenannten Durchbruchspannung (Flussspannung) kommt es dann aber zu einem exponentiell stark ansteigenden Stromfluss (vgl. Abbildung 7). Dies geschieht durch das „Hineindrängen“ (Injizieren) von Elektronen in die p-dotierte Zone und das Injizieren von Defektelektronen in die n-dotierte Zone. Dabei wird die Raumladungszone im Prinzip „geflutet“, es fließt ein Strom.

Gelangen Elektronen in die p-dotierte Zone mit Elektronenmangel, d. h. Löcherüberschuss, so „fallen“ die Elektronen in diese Löcher – sie rekombinieren. Ebenso verhält es sich in der n-dotierten Zone – die injizierten positiven Ladungsträger (Löcher) nehmen die überschüssigen freien Elektronen auf. Es kommt auch hier zu einer Rekombination.

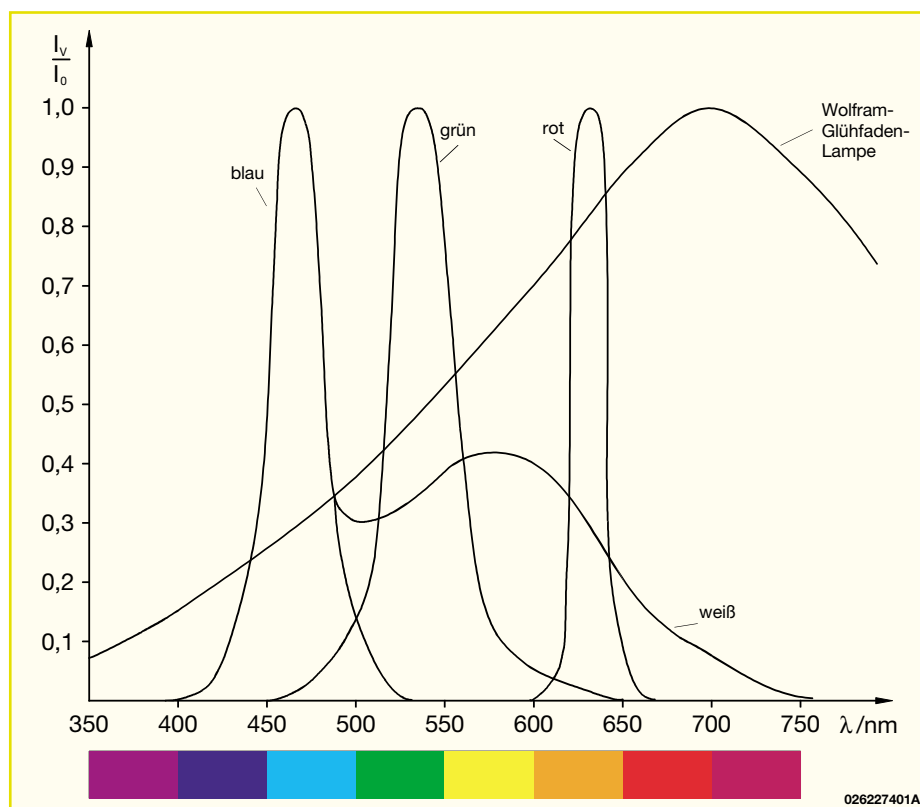


Bild 1: Spektrale Verteilung der Strahlung verschiedenfarbiger LEDs

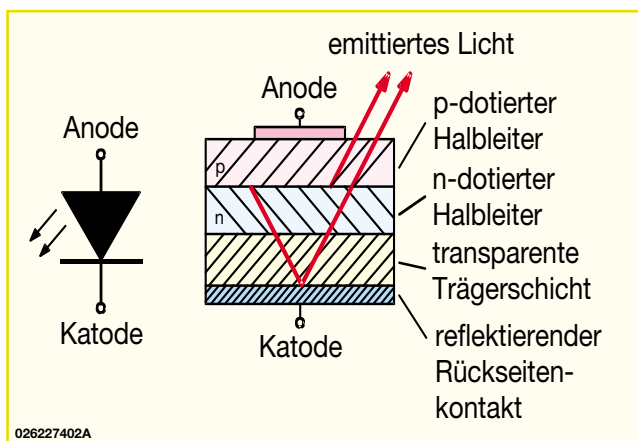


Bild 2: Prinzipieller Aufbau des Halbleiterkristalls einer LED

Bei diesem Vorgang der Rekombination kommt es dann zur Freisetzung eines Energiequants, d. h. zur Abgabe einer genau definierten Energiemenge, die hauptsächlich in Form von Strahlungsenergie (Licht) auftritt. Die Höhe der erzeugten Strahlungsenergie ist dabei von einer Eigenschaft des verwendeten Halbleitermaterials, dem sogenannten Bandabstand (band gap), abhängig. Die Wellenlänge der Strahlungsenergie ist dabei umgekehrt proportional zu der bei einer Rekombination freigesetzten Energiemenge. Somit ist die Wellenlänge der Strahlung, die ja im sichtbaren Bereich die Farbe des Lichtes repräsentiert, direkt mit der Materialeigenschaft des Halbleiters verknüpft. Das emittierte Spektrum ist dabei sehr schmalbandig, d. h. es wird nur ein kleiner Wellenlängenbereich von wenigen zig Nanometern emittiert – das Licht ist somit einfarbig (monochromatisch).

In Tabelle 1 sind einige Halbleitermaterialien mit den zugehörigen emittierten Wellenlängen (Farben) und Flussspannungen zu sehen. Beispielsweise emittiert das Material GaAsP (Gallium-Arsen-Phosphid) elektromagnetische Strahlung bei ca. 655 nm, die das Auge als rot wahrnimmt.

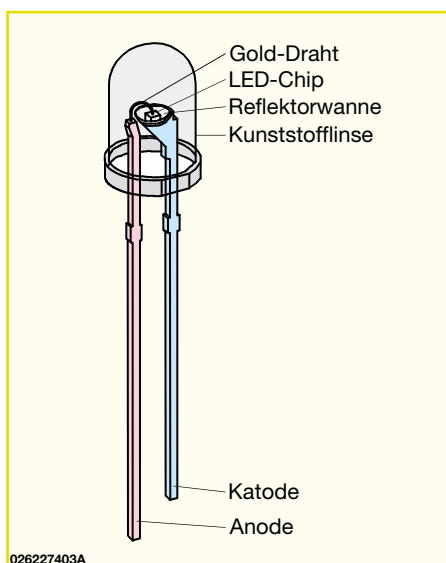


Bild 3: Prinzipieller Aufbau einer LED

Durch die geschickte Wahl des Materials und der Dotierung lassen sich nahezu alle Spektralfarben generieren. Da sich weißes Licht ja bekanntlich aus einer Mischung von wenigstens drei verschiedenen Farben (Rot, Grün, Blau) zusammensetzt, kann ein einzelner LED-Halbleiterkristall nicht direkt weißes Licht erzeugen. Hierzu bedient man sich dann eines sogenannten Lumineszenz-Konverters, der Strahlung



Bild 4: Runde LEDs in verschiedener Größe und Farbe

absorbiert und in einem anderen Wellenlängenbereich wieder abgibt.

Zur Erzeugung weißen Lichts wird eine blaue LED (z. B. eine GaInN-LED) mit Phosphor überzogen. Bei der stattfindenden sog. Phosphor-Down-Conversion absorbiert der Phosphor einen Teil des blauen Lichtes, wandelt diesen um und gibt seinerseits ein breites Spektrum an Strahlung mit hauptsächlich gelblichem Charakter wieder ab. Die so entstehende Mischung von blauer und gelber Strahlung führt zu einem insgesamt weißen Gesamteindruck. Das Funktionsprinzip ist ähnlich dem in Leuchtstofflampen.

In Abbildung 1 sind die Spektren der

einzelnen LEDs zusammengefasst. Um hier die Zuordnung der Wellenlänge zur entsprechenden Farbe zu erleichtern, befindet sich unterhalb der X-Achse die zugehörige Farbskala. Gut zu erkennen sind die relativ schmalen Spektren der Grundfarben-LEDs (Rot, Grün, Blau) und das mit starkem Blauanteil versehene Spektrum der weißen LED.

Aufbau und Bauformen

Neben dem elektrischen Verhalten bestimmt auch der mechanische Aufbau die Parameter Lichtstärke und Wirkungsgrad. Der prinzipielle Aufbau des Halbleiterkristalls ist in Abbildung 2 zu sehen, während Bild 3 den mechanischen Aufbau zeigt. Eine LED besteht üblicherweise aus dem eigentlichen LED-Chip, der Kontaktierung, einem Golddraht und einem Kunststoffgehäuse. Der Chip ist dabei in einer als Reflektor ausgeführten Wanne eingeklebt. Diese Wanne ist gleichzeitig der Katodenanschluss der LED. Der obere Anodenanschluss wird mittels eines hauchdünnen



Bild 5: Sonderbauformen verschiedener LEDs

Golddrahtes kontaktiert und mit dem Anodenanschluss verbunden. Eine Kunststofflinse umschließt den Aufbau.

Der mechanische Aufbau ist im Wesentlichen für die Abstrahleigenschaften verantwortlich. Diese optische Abstrahlcharakteristik legt die Geometrie des Reflektors, die Position des LED-Chips innerhalb des Gehäuses und die Form des Kunststoffgehäuses fest.

LEDs lassen sich in sehr unterschiedlichen Formen speziell an den Einsatzfall angepasst herstellen. Die Vielfalt an verschiedenen Bauformen zeigen die Abbildungen 4, 5 und 6. Hier sind neben den runden Standard-Bauformen mit verschiede-

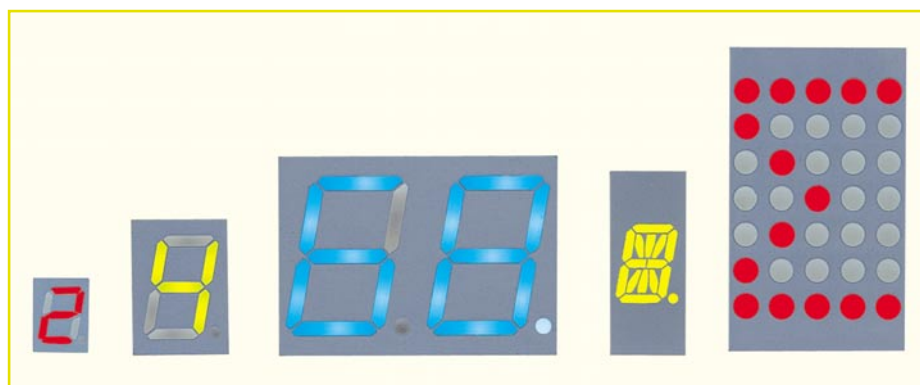


Bild 6: LED-Displays

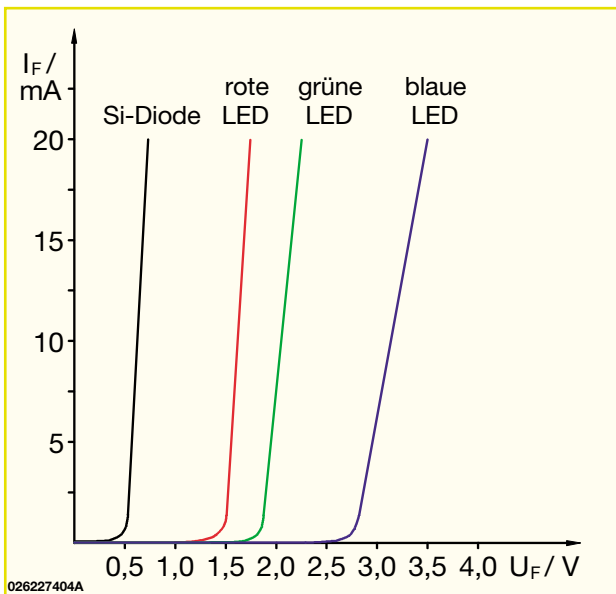


Bild 7: Strom-Spannungskennlinie verschiedener LEDs in Vergleich zu einer Si-Diode

technischen Daten meist auf einen Vorwärtsstrom von 20 mA beziehen. Speziell für batteriebetriebene Anwendungen wurden sogenannte Low-current-LEDs entwickelt, die bereits bei Strömen ≤ 1 mA zu leuchten beginnen.

Wie bereits erwähnt, muss der LED-Strom stets begrenzt oder geregelt sein. Die Flussspannung, d. h. die bei einem bestimmten Strom an der Diode „abfallende“ Spannung (vgl. Abbildung 7), unterliegt starken Exemplarstreuungen. Aufgrund des steilen Kennlinienverlaufes haben kleine Spannungsänderungen schon große Stromänderungen zur Folge, die zu starken Helligkeitsschwankungen führen. Somit ist der Betrieb an einer meist vorhandenen Spannungsquelle nur über einen strombestimmenden Vorwiderstand möglich. Diese in Abbildung 8 a gezeichnete Schaltung ist auch gleichzeitig die einfachste Art, eine LED zu betreiben.

Der gewünschte LED-Strom I_F , die Betriebsspannung U und die Flussspannung U_F ergeben über folgende Gleichung den erforderlichen Vorwiderstand R_V :

$$R_V = \frac{U - U_F}{I_F}$$

Der Widerstand muss weiterhin für die entstehende Verlustleistung P_V ausgelegt werden:

$$P_V = I_F^2 \cdot R_V$$

denen Durchmessern (Bild 4) in Abbildung 5 auch diverse Sonderbauformen dargestellt. Die rechteckigen und quadratischen LEDs besitzen dabei nur eine andere Form des Kunststoffgehäuses. Bei der gezeigten runden LED handelt es sich um eine sogenannte Duo-LED, die zwei LED-Chips unterschiedlicher Farbe in einem Gehäuse vereint.

An die Hinterleuchtung von Displays mittels LED-Leuchtmitteln werden ganz besondere Anforderungen gestellt – speziell hierfür gibt es die sogenannten Side-Looking-Lamps; aber auch SMD-LEDs kommen hier sehr oft zum Einsatz. Neben den Einzel-LEDs zu Beleuchtungs- und Signalisierungszwecken sind LED-Displays (Abbildung 6) sehr weit verbreitet. Hierbei handelt es sich prinzipiell um einzelne LEDs, die besonders geformt in einem Gehäuse zusammengefasst werden. Die bekannteste Form ist wohl die 7-Segmentanzeige, die gerne als sehr gut lesbare numerische Anzeige zum Einsatz kommt. Auch diese gibt es in verschiedenen Größen und Farben. Flexibler einsetzen lassen sich sogenannte Dot-Matrixanzeigen, bei denen sich der Anwender seine Buchstaben, Zahlen und Symbole selbst konstruieren kann.

Praktische Anwendung

Die Handhabung von LEDs ist gegenüber konventionellen Leuchtmitteln leicht verändert. Hier gilt es zwei nicht unwesentliche Punkte zu beachten: Zum einen ist bei einer LED die Stromrichtung zu beachten, zum anderen ist die emittierte Lichtstärke vom fließenden Strom und nicht von der anliegenden Spannung abhängig.

Da eine LED in ihrer Urform immer noch eine Diode darstellt, ist für den Einsatz die korrekte Polarität des speisenden Stromes stets zu berücksichtigen. Die recht

kleine maximale Sperrspannung von ca. 5 V macht das Bauteil auch relativ empfindlich gegen eine falsche Polung. Die Kennzeichnung am Bauteil erfolgt dabei über die in den meisten Gehäusevarianten gut erkennbare Reflektorwanne am Katenanschluss.

Des Weiteren ist aufgrund der recht steilen Strom-Spannungskennlinie (siehe Abbildung 7) nur der Betrieb mit Stromsteuerung / Strombegrenzung erlaubt. Die Helligkeit einer Leuchtdiode ist stets vom fließenden Strom abhängig. Üblicherweise werden LEDs mit Strömen im Bereich von 5 mA bis 20 mA betrieben, wobei sich die

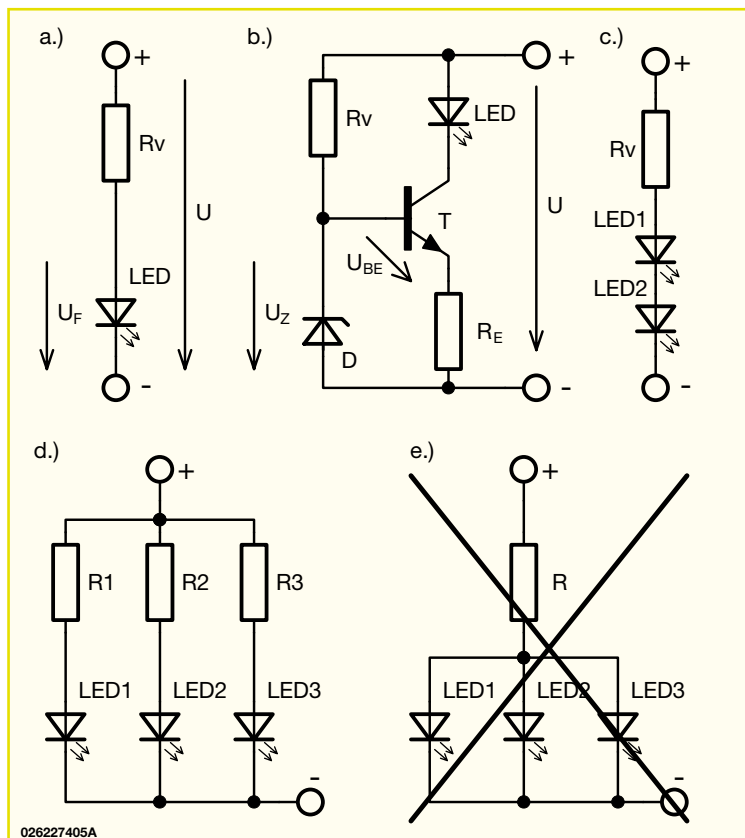


Bild 8: Schaltungsbeispiele für den Betrieb von LEDs

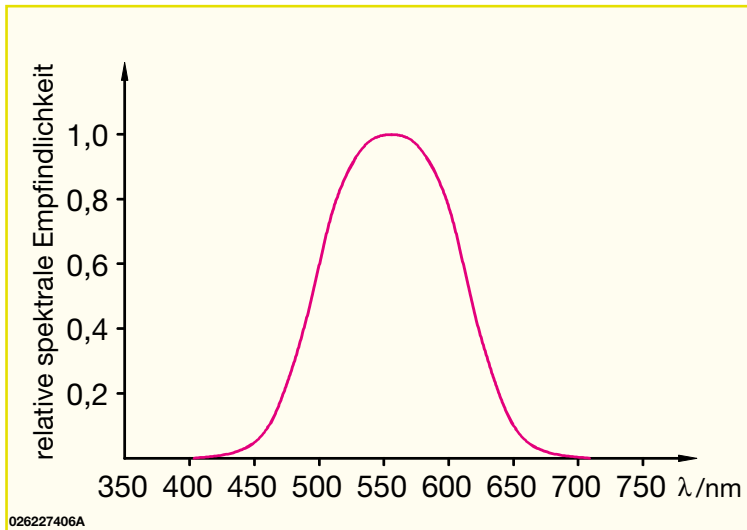


Bild 9:
Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges (V(λ)-Kurve)

Für den Betrieb einer gelben superhellen LED ($U_F = 1,8 \text{ V}$, $I_F = 20 \text{ mA}$, vgl. Tabelle 1) an 5 V Betriebsspannung ergibt sich somit folgender Vorwiderstand:

$$R_V = \frac{5 \text{ V} - 1,8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 160 \Omega$$

In diesem Fall wird ein Widerstand von 180Ω aus der E-12-Reihe gewählt, mit dem ein LED-Strom von $17,8 \text{ mA}$ zustande kommt. Der Widerstand muss folgende Verlustleistung verkraften:

$$P_V = (17,8 \text{ mA})^2 \cdot 180 \Omega = 57 \text{ mW}$$

Der Betrieb mit einem einfachen Vorwiderstand bedingt eine stabile Betriebsspannung, da sonst die sich ändernde Spannung einen ebenso schwankenden Strom nach sich zieht, der wiederum die Helligkeit der LED verändert. Für den Betrieb an nicht stabilisierten Spannungen empfiehlt es sich daher, eine Konstantstromquelle einzusetzen. Eine extrem einfache Variante zeigt Abbildung 8 b. Hier berechnet sich der LED-Strom über folgende Gleichung:

$$I_F = \frac{U_Z - U_{BE}}{R_E}$$

Da die Spannung an der Basis des Transistors via Z-Diode stabilisiert ist, ist auch der Diodenstrom unabhängig von Betriebsspannungsschwankungen.

Sollen mehrere LEDs an einer Quelle betrieben werden, so gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten der Zusammenschaltung: die Reihen- und Parallelschaltung.

In Abbildung 8 c und d sind zwei mögliche Varianten aufgezeigt. Da die Flussspannung von LEDs Exemplarstreuungen unterliegt, ist die in 8 e gezeigte Schaltung nicht brauchbar. Hier würde im Extremfall die LED mit der geringsten Flussspannung den gesamten Strom tragen, während diese Spannung in den übrigen LEDs noch zu

keinem Stromfluss führt. Somit leuchtet dann auch nur eine LED auf.

Wenn es die Höhe der zur Verfügung stehenden Betriebsspannung zulässt, ist immer die Variante 8 c zu verwenden. Hierbei ist auf jeden Fall sichergestellt, dass alle LEDs vom selben Strom durchflossen werden und somit auch die gleiche Helligkeit besitzen. Außerdem ist nur ein Vorwiderstand notwendig, der aufgrund des reduzierten Spannungsabfalles auch weniger Verlustleistung umsetzen muss.

Technische Daten von Leuchtdioden

Bei der Auswahl von Leuchtdioden für einen bestimmten Einsatzzweck steht zunächst fast immer die Wellenlänge (Farbe) im Vordergrund. Diese wird in den technischen Daten entweder in Klartext angegeben oder aber in Form der Wellenlängenangabe charakterisiert. Den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und zugehöriger Farbe zeigt Abbildung 1 ansatzweise. Die Übergänge zwischen den Farben sind normalerweise fließend, sodass der Farbverlauf eines Regenbogens von Blau-Violett (380 nm) bis Tiefrot (780 nm) entsteht.

Weiteres Kriterium ist die Helligkeit, die erreicht werden soll. Hier gibt die Lichtstärke I_v (Einheit: cd = Candela) einen Anhaltspunkt. Dies ist per Definition der in eine bestimmte Richtung (Raumwinkel) ausgestrahlte Lichtstrom. Der Lichtstrom ϕ_v (Einheit: lm = Lumen) wiederum ist die Gesamtheit der von einer Lichtquelle (z. B. LED-Chip) erzeugten Lichtleistung. In die technische Angabe Lichtstärke geht also neben dem Lichtstrom auch noch der Abstrahlwinkel mit ein. Dies bedeutet, dass eine LED mit 30° Abstrahlwinkel eine höhere Lichtstärke hat als der gleiche LED-Chip mit 60° Abstrahlwinkel. Somit muss bei der Beurteilung der Lichtstärke immer

auch der Abstrahlwinkel berücksichtigt werden.

Außerdem ist zu beachten, dass das Auge nicht für alle Farben die gleiche Empfindlichkeit besitzt. Die hier beschriebenen visuellen Größen Lichtstrom und Lichtstärke berücksichtigen immer die sogenannte spektrale Hellempfindlichkeit des Auges gemäß Abbildung 9. Diese sagt aus, dass das Auge im grünen Bereich (ca. 555 nm) seine maximale Empfindlichkeit besitzt. Somit empfindet das menschliche Auge eine grüne Lichtquelle wesentlich heller als eine mit gleicher Leistung strahlende rote oder blaue Lichtquelle. Dies erklärt dann auch, warum derzeit die größten Lichtstärken bei grünen LEDs zu finden sind.

Als weitere technische Daten sind der für eine bestimmte Lichtstärke erforderliche Stromfluss und die daraus resultierende Flussspannung zu sehen. Diese Daten werden bei der Schaltungsauslegung benötigt. Um eine LED in ihrer Helligkeit zu regeln, muss der Strom variiert werden. Der Zusammenhang zwischen Strom und Lichtstärke ist innerhalb des erlaubten Betriebsbereiches sehr linear.

Als letzte elektrische Eigenschaft soll der Wirkungsgrad betrachtet werden. Der innere Wirkungsgrad (innere Quanteneffizienz) liegt bei über 90 % – dies bedeutet, dass mehr als 90 % der elektrischen Energie in Licht umgesetzt wird. Auf dem Weg von der strahlenden Sperrschicht nach außen wirkt dann allerdings eine nicht zu verachtende optische Dämpfung. Somit liegt der Wirkungsgrad letztlich bei 20 % bis 30 %. Bei LEDs wird der Wirkungsgrad üblicherweise als Lichtausbeute bezeichnet, die das Verhältnis von Lichtstrom zu zugeführter Leistung wiedergibt. Dieser Wert liegt derzeit bei superhellen LEDs bei ca. 55 lm/W; im Vergleich dazu bringt es eine normale Glühlampe auf etwa 15 lm/W.

Die Entwicklung im Bereich der LEDs geht rasant voran. Innovationen sind auf dem Gebiet der Chip-Struktur und in der Entwicklung von verbesserten Phosphorbeschichtungen zu erwarten. Ziel ist es dabei, eine höhere Lichtausbeute und einfache Produktionstechniken zu entwickeln, um damit letztlich die Gesamtkosten pro emittierter Lichtleistung zu reduzieren. ELV

Weitere Informationen zum Thema LEDs sind auf folgenden Internetseiten zu finden:

- <http://www.semiconductor.agilent.com>
- <http://www.nichia.co.jp>
- <http://www.osram-os.com>
- <http://www.wustlich.de>
- <http://www.liteon.com>