

LED - Know How

Leuchtdioden sind - wenn es um das Beleuchten von Fahrzeugmodellen oder Szenarien auf der Modellbahn geht, wahre Allround-Genies: Es gibt sie in unzähligen Formen, Größen, Farben und Helligkeiten. Im Vergleich zu Glühlampen haben LEDs diverse Vorteile:

- Sie verbrauchen weniger Strom.
- Sie erzeugen im Betrieb kaum Wärme.
- Sie sind langlebiger.

Wenn Sie sich jetzt fragen, warum Sie auf Ihrer (älteren) Anlage und in vielen Fahrzeugmodellen noch häufig Glühlämpchen finden und LEDs nicht standardmäßig für die Modellbahn eingesetzt werden, so liegt das vor allem daran, dass LEDs eine recht junge Erfindung sind. Sie sind erst seit den 1970er Jahren ein Massenprodukt und ihre Verwendung in Alltagsgegenständen wurde sogar erst in den 1990er Jahren üblich. Die Vielfarbigkeit von LEDs, die wir heute kennen, ist eine noch jüngere Entwicklung: Noch zu Anfang des Jahrtausends waren blaue und weiße LEDs zwar verfügbar, jedoch teuer. Bei den ersten weißen LEDs, die lieferbar waren, kam ein weiteres Manko hinzu: kaltweiße LEDs hatten häufig einen blauen Farbstich, warmweiße einen grün-gelben.

Diese Probleme sind gelöst. Heute überwiegen daher oft die Vorteile von LEDs gegenüber Glühlämpchen, wenn Umbauten an Modellen anstehen oder defekte Leuchtmittel ersetzt werden müssen.

Wo Licht ist, ist jedoch bekanntlich auch Schatten: Bei der Auswahl der "richtigen" LED und beim Anschluss ist deutlich mehr Know How erforderlich als bei der Verwendung von Glühlampen.

Einige LED-Bauformen im Größenvergleich:



oben: bedrahtete LED 3 mm
unten (von links nach rechts):
SMD-Bauformen 0402, 0603, 0805, PLCC2

Damit sie überhaupt leuchten

Strom begrenzen!

LEDs leuchten, wenn in Durchlass-Richtung Strom durch sie hindurchfließt. Dabei gilt: Je höher der Strom, desto heller leuchten sie. Ab einem bestimmten Strom können sie jedoch nicht mehr heller werden, die überschüssige Energie wird dann nicht in Licht, sondern in Wärme umgewandelt – und die LED stirbt mit einem letzten Lichtblitz den Hitzetod.

Der maximale Dauerstrom, den Modellbahn-typische LEDs "vertragen", liegt meistens bei 20 mA. Geringe Überschreitungen führen i.d.R. nicht zur sofortigen Zerstörung, verringern jedoch immer die Lebensdauer. Daher gilt es, den Strom, der durch die LED hindurchfließt, zuverlässig zu begrenzen. Zwei Lösungen stehen zur Wahl:

- vor die LED(s) einen Vorwiderstand schalten, der den Stromfluss begrenzt.
- eine Konstantstromquelle vorschalten, die die LED(s) mit einem definierten Strom (meist 20 mA) versorgt.

Bei manchen Schaltungen für den Einsatz auf der Modellbahn sind die Ausgänge speziell für den Anschluss von Leuchtdioden ausgelegt und Vorwiderstände oder eine Konstantstromquelle auf der Platine integriert. Ein zusätzlicher Vorwiderstand ist dann nicht erforderlich.

Ausgänge von Fahrzeug-Decodern sind meistens nicht speziell für den Anschluss von LEDs ausgelegt (sonst könnte man ja keine Lämpchen oder andere Zubehörteile anschließen). Daher muss hier i.d.R. ein Vorwiderstand oder eine LED-Konstantstromquelle vorgeschaltet werden.

Schaltungen für den Anschluss von LEDs:



Wechselblinker WBA-1:

Der Vorwiderstand für die LEDs (z.B. für Warnleuchten in Andreaskreuzen) ist auf der Platine integriert.



LED Control mit LED in Form einer klassischen Zugschlusslaterne:

Die LED-Konstantstromquelle auf der LED Control begrenzt den Strom auf 20 mA. Um LEDs bei kurzen Stromunterbrechungen zu versorgen, kann ein externer Stützkelo angeschlossen werden.

Exkurs: Vorwiderstand oder LED-Konstantstromquelle?

Vorwiderstände sind (vor allem wegen ihres niedrigen Preises) erste Wahl, wenn die Versorgungs-Spannung konstant ist. Das ist typischerweise bei Haus- und Kirmesbeleuchtungen der Fall und natürlich bei allen anderen LEDs, die irgendwie fest mit der Modellbahn-Platte verbunden sind (also auch bei den auf die Platte geklebten Autos).

LED-Konstantstromquellen kommen vor allem in Fahrzeugen zum Einsatz, deren Spannungsversorgung über die Schienen erfolgt. Ohne LED-Konstantstromquelle

- leuchten in analogen Anlagen die LEDs umso heller, je schneller die Lok fährt (je höher die Fahrspannung ist).
- flackern die LEDs in digitalen Anlagen, die mit unregelmäßigen Boostern betrieben werden, sobald sich die Belastung im Boosterkreis ändert. In digitalen Anlagen, die mit geregelten Boostern betrieben werden, kann es zum Flackern der LEDs kommen, wenn die Einspeisung in zu großen Abständen erfolgt.
- flackern LEDs, die in stromlosen Abschnitten über Stützkelos versorgt werden.

Eine ausreichende Spannung anlegen!

An den LEDs stellt sich automatisch die für den Typ spezifische "Durchlass-Spannung" ein, sobald ein Strom fließt. Sie ist nicht für alle LEDs gleich und wird daher in den technischen Daten angegeben. Ein Anhalt:

- LEDs in **gelb, orange, rot** und **grün**: ca. 2 V
- LEDs in **weiß** und **blau, ultrahell grüne** LEDs: ca. 4 V.

Ist die anliegende Versorgungsspannung niedriger als die Durchlass-Spannung, kann kein Strom fließen. Standardbatterien mit einer Nennspannung von 1,5 V reichen folglich nicht aus, um LEDs zum Leuchten zu bringen. Ist der Einsatz von Batterien mit einer höheren Nennspannung nicht möglich, muss eine Elektronik zwischen Batterie und LED geschaltet werden, die die Spannung erhöht.

Mit Spannungsverdopplung



Die FCS-Module haben wir speziell für den Einsatz in Fahrzeugen für das Faller Car System entwickelt:

Um weiße und blaue LEDs versorgen zu können **ohne** die Standard-Akkus (mit 2 x 1,2 V Nennspannung) zu tauschen, haben die FCS-Module eine Spannungsverdopplung für die betreffenden Ausgänge. Nachteil der Lösung: die Akkus sind schneller leer.

Richtig gepolt anschließen!

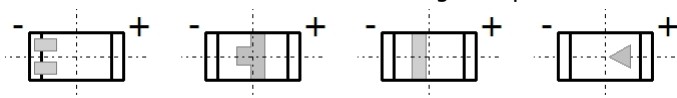
LEDs leuchten, wenn in Durchlass-Richtung ein Strom hindurchfließt. Sie müssen daher wie folgt an die Versorgungsspannung angeschlossen werden:

- die Kathode (-) → an den negativen Pol der Spannungsquelle
- die Anode (+) → an den positiven Pol der Spannungsquelle

Werden sie falsch gepolt angeschlossen, leuchten LEDs nicht, werden aber auch nicht beschädigt – vorausgesetzt die Sperrspannung wird nicht überschritten (dazu Näheres im nächsten Abschnitt).

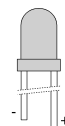
Welches ist die Kathode, welches die Anode?

- bedrahtete LEDs: Bei den Standard-LEDs (1,8 mm, 3 mm und 5 mm) kann man davon ausgehen, dass die Kathode (-) das kürzere "Beinchen" und die Anode das längere hat.
- größeren SMD-LEDs (z.B. PLCC2): Hier findet man häufig Kerben oder abgeschrägte Ecken als Kennzeichnung für die Kathode (-).
- kleinere SMD-LEDs (z.B. Bauformen 0402, 0603 oder 0805): Bei diesen sind oft die Markierungen auf der Unterseite angebracht. Was die Markierungen zu bedeuten haben, ergibt sich jedoch häufig erst durch einen Blick in das Datenblatt. Einige Beispiele:

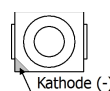


Wie kann man sich das merken?

Wir sind bei unseren Recherchen auf einen Merksatz gestoßen, der zwar orthografisch etwas fragwürdig ist, dafür aber im Gedächtnis bleibt:



für bedrahtete Standard-LEDs:
Kathode - kurz - nekativ



ergänzt für größere SMD-LEDs:
Kathode – markiert – nekativ

Tipp: LED-Tester verwenden!

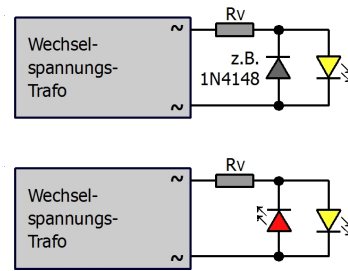
Die Polung einer LED lässt sich mit Hilfe eines LED-Testers leicht feststellen (und nebenbei auch ihre Helligkeit, Farbe und ihr Abstrahlwinkel). Es gibt Versionen, die sowohl für den Test von bedrahteten LEDs als auch von SMD-LEDs geeignet sind.

Geisterfahrer im Blick behalten!

Die Sperrspannung ist die maximale Spannung, die die LED "verträgt", wenn die Spannung in Gegenrichtung anliegt (meistens 5 V). Sie ist für Modellbahner keineswegs ein zu vernachlässigender Wert, denn:

Wenn die LED von einem Wechselsspannungs-Trafo versorgt wird – einem auf der Modellbahn ja durchaus üblichen Fall – wechselt die Polarität in regelmäßigen, kurzen Abständen. Die LED wird also abwechselnd in Durchlass- und in Sperr-Richtung betrieben. Dieser ständige Wechsel verursacht häufig ein sichtbares (und manchmal störendes) Flackern. Darüberhinaus verringert sich die Lebenserwartung der LED durch das ständige Ein- und Ausschalten – umso mehr, je deutlicher die Sperrspannung überschritten wird.

Anschluss von LEDs an Wechselspannung



oben: mit Ableitdiode (z.B. 1N4148), die für die Sperr-Richtung der gelben LED die Spannung ableitet

unten: paralleler Anschluss von zwei Leuchtdioden: Die eine wirkt für die Sperr-Richtung der jeweils anderen LED als Ableitdiode.

Elektrische Eigenschaften

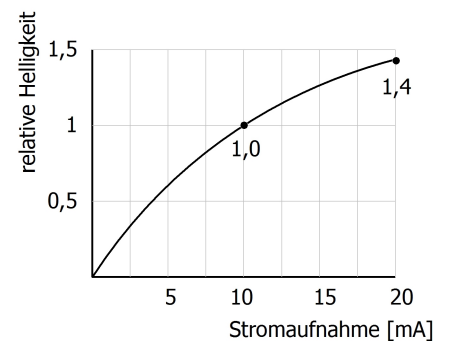
Stromaufnahme I_f [mA]

Die meisten LEDs, die im Modellbau und auf der Modellbahn zum Einsatz kommen, sind für den Betrieb mit einem Dauerstrom von 20 mA ausgelegt. Für diesen Wert werden vom Hersteller die Durchlass-Spannung, die maximale Lichtstärke und die Lebensdauer angegeben. Kurzfristig können diese LEDs meistens einen höheren Strom bis 25 oder 30 mA "vertragen", erst bei einem noch höheren Stromfluss werden sie zerstört. Um den Strom wirksam zu begrenzen, muss grundsätzlich ein Vorwiderstand oder eine Konstantstromquelle vorgeschaltet werden.

Die Helligkeit der LEDs folgt dem Betriebsstrom: Je höher der Betriebsstrom, desto heller leuchten sie. Die Zunahme der Helligkeit ist meist nicht proportional zum Anstieg der Stromaufnahme, wie die nebenstehende (typisierte) Abbildung zeigt. Gerade bei den sehr hellen LEDs ist der Helligkeitsunterschied zwischen einem Betriebsstrom von 10 oder 20 mA in typischen Modellbauanwendungen kaum wahrnehmbar.

Low Current LEDs leuchten bereits bei einem sehr niedrigen Strom von 2 mA relativ hell – ein Wert, bei dem andere LEDs nicht oder nur sehr schwach leuchten.

Relative Helligkeit in Abhängigkeit von der Stromaufnahme (typischer Verlauf):



Tipp: Um Strom zu sparen (und die LEDs zu schonen), ist es empfehlenswert, den Strom auf 10 bis 15 mA zu begrenzen. Der Helligkeitsunterschied ist bei Anwendungen auf der Modellbahn häufig kaum wahrnehmbar.

Durchlass-Spannung U_f [V]

Die Durchlass-Spannung (auch als Schwellenspannung bezeichnet) gibt an, welche Spannung sich einstellt, sobald der Strom fließt. Ist die anliegende Versorgungs-Spannung niedriger als die Durchlass-Spannung der LED, fließt kein Strom und die LED leuchtet nicht.

Wenn der Strom auf einen Wert von deutlich unter 20 mA begrenzt wird (z.B. 10 mA), reicht es aus, die Werte der Vorwiderstände mit Hilfe der ca.-Werte für die Durchlass-Spannung überschläglich zu berechnen. Wenn jedoch eine maximale Helligkeit erzielt werden soll, d.h. die LED mit dem maximalen Strom betrieben wird, ist es empfehlenswert, die exakten Werte der Durchlass-Spannung für die Berechnung zu Grunde zu legen.

Durchlass-Spannungen von LEDs:

Leuchtfarbe	Werte aus technischen Datenblättern	Werte für überschlägliche Berechnungen
weiß	3 - 4 V	4 V
gelb	1,9 - 2,5 V	2 V
orange	1,9 - 2,5 V	2 V
rot	1,6 - 2,2 V	2 V
grün	1,9 - 2,5 V	2 V
blau	3 - 4 V	4 V

Sperrspannung [V]

Die Sperrspannung ist die maximale Spannung, die die LED "verträgt", wenn die Spannung in Gegenrichtung anliegt. Die Sperrspannung ist in den technischen Daten angegeben und beträgt in der Regel 5 V.

Mehr zum Thema auf Seite 3.

Tipp: Bei Anschluss an Wechselspannungs-Trafos werden LEDs abwechselnd in Durchlass- und in Sperr-Richtung betrieben. Damit die LEDs trotzdem lange "leben", muss in Sperr-Richtung eine Ableitdiode vorgesehen werden.

Optische Eigenschaften

Wellenlänge λ [nm]

Die Leuchtfarbe einer LED entspricht direkt einer bestimmten Wellenlänge λ , angegeben in der Einheit nm (Nanometer). Je deutlicher die für eine LED angegebene Wellenlänge in der Mitte des zugeordneten Bereichs liegt, desto eindeutiger ist die Farbe. Bei einer Wellenlänge "am Rand" eines Bereichs ist die Einordnung der Farbe schwierig: Eine LED mit einer Wellenlänge von z.B. 608 nm ist laut Definition orange, erscheint jedoch hellrot.

Wellenlänge von LEDs:

blau	450 - 500 nm
grün	500 - 570 nm
gelb	570 - 590 nm
orange	590 - 610 nm
rot	610 - 760 nm

Farbtemperatur [K]

"Weiß" ist im physikalischen Sinne keine einzelne Farbe, sondern eine Mischung verschiedener Spektralfarben. Das von LEDs emittierte weiße Licht kann daher keiner bestimmten Wellenlänge zugeordnet werden. Zur Beschreibung der verschiedenen weißen Leuchtfarben dient die Farbtemperatur (angegeben in Kelvin). In der Tabelle sind die Bezeichnungen gemäß DIN 5035 verwendet. Bezeichnungen wie

Farbtemperaturen weißer LEDs (DIN 5035):

warmweiß	< 3.300 K (ab ca. 2.700 K)
neutralweiß	3.300 - 5.000 K
tageslichtweiß (kaltweiß)	> 5.000 K (bis ca. 8.000 K)

- golden white und super golden white
- sunny white oder
- skywhite

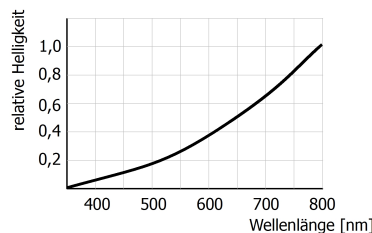
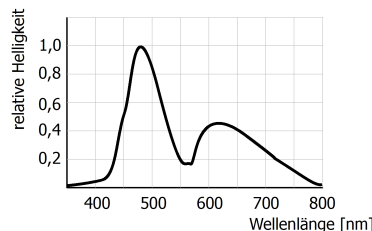
sind Hersteller-spezifische Bezeichnungen, die nicht allgemeingültig definiert sind. Als "golden white" bezeichnete LEDs verschiedener Anbieter können daher sehr unterschiedliche Farbtemperaturen haben.

Farbwiedergabe

Die Diagramme, in denen die Farbspektren von LEDs dargestellt sind, wecken auf den ersten Blick Assoziationen an Gebirgslandschaften. Sie bilden ab, wie groß der Anteil der verschiedenen Wellenlängen an der gesamten Strahlungsleistung einer LED ist. Fachleute leiten aus diesen Diagrammen die Farbtemperatur ab und können erkennen, wie gut die Farbwiedergabe einer LED ist.

Für alle Leuchtmittel gilt vereinfacht: Je flacher und kleiner die Wellentäler zwischen den Spitzen sind, desto mehr Farbtöne der angestrahnten Gegenstände werden naturgetreu wiedergegeben. Das Farbspektrum einer idealen weißen LED mit einer absolut naturgetreuen Farbwiedergabe wäre demnach eine gerade Linie. Eine solche LED gibt es aber nicht.

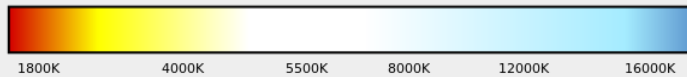
Glühlampen haben ein kontinuierliches Lichtspektrum und erreichen daher trotz ihrer Gelb-/Rot-Dominanz eine sehr gute Farbwiedergabe. Im Gegensatz zu Glühlampen haben LEDs kein kontinuierliches Lichtspektrum, weshalb der Farbwiedergabeindex schlechter ist.



oben: Farbspektrum einer weißen LED
unten: Farbspektrum einer Glühlampe

Exkurs: Das "richtige" Weiß

Um die "richtige" weiße LED für ein bestimmtes Vorhaben zu finden, lohnt es sich, eine LED mit einer dem Vorbild entsprechenden Farbtemperatur auszusuchen. Bei der Frage, ob eine Leuchtfarbe im Modell als "richtig" (bzw. vorbildgerecht) empfunden wird, spielen jedoch auch individuelle Sehgewohnheiten eine große Rolle. Von Glühlampen sind wir z.B. Farbtemperaturen von 2300 bis 2900 K gewohnt, also ein Licht, das deutlich gelb-rötlicher ist als das natürliche Tageslicht mit 5000 bis 7000 K.



Die Grafik vermittelt einen Eindruck von der Leuchtfarbe weißer LEDs mit verschiedenen Farbtemperaturen (gibt aber keineswegs "verbindlich" die Leuchtfarbe wieder).

Farbtemperatur	Lichtquellen	LED-Empfehlung
500 K	Kerzen	gelb oder warmweiß ("golden white")
2000 K	Natriumdampf lampen (Verwendung z.B. als Straßenbeleuchtung)	gelb oder warmweiß ("golden white")
2600–3000 K	Glühlampen	warmweiß
2700–3200 K	Halogenlampen	warmweiß
4000 K	Leuchtstofflampen	neutralweiß
4120 K	Mondlicht	neutralweiß
4500–5000 K	Xenonlampen (Verwendung z.B. als Kfz-Scheinwerfer)	neutralweiß
5000 K	Morgen-/Abendsonne	kaltweiß
5500 K	Vormittags-/Nachmittagssonne	kaltweiß
5500–5600 K	Elektronenblitzgerät	kaltweiß
5500–5800 K	Mittagssonne, Bewölkung	kaltweiß
6500–7500 K	Bedeckter Himmel	kaltweiß
7500–8500 K	Nebel, starker Dunst	kaltweiß
9000–12.000 K	blauer (wolkenloser) Himmel auf der beschatteten Nordseite, kurz nach Sonnenuntergang/kurz vor Sonnenaufgang ("blaue" Stunde)	kaltweiß mit "Blaustich"

Die vorherrschenden Farben eines Modells (z.B. die Farben der Inneneinrichtung eines Wagens) können die Wirkung der LEDs stark beeinflussen. Erschwerend kommt hinzu, dass LEDs nicht alle Farben gleich intensiv wiedergeben. Je nach Farbspektrum der LED kann es vorkommen, dass eine vorherrschende Farbe besonders betont oder unterdrückt wird.

Ebenso spielt die Art und Weise der Weiterleitung des Lichts eine große Rolle. Lichtleiter können z.B. aufgrund ihrer Ausführung oder der Alterung bestimmte Farbanteile herausfiltern und so die Farbwiedergabe beeinflussen.

Optische Eigenschaften (Teil 2)

Öffnungswinkel [°]

Anders als Glühlampen haben LEDs einen begrenzten Öffnungswinkel (auch als Abstrahlwinkel bezeichnet) und bestrahlen daher nur eine Teilfläche (bezogen auf die Oberfläche einer Kugel um die Strahlungsquelle im Zentrum). Typische Öffnungswinkel von bedrahteten 3 mm-LEDs sind 20, 30 oder 40°, von SMD-LEDs ca. 120 °.

Lichtstärke [mcd]

Die Abkürzung mcd steht für "Milli-Candela" und ist der Indikator für die Helligkeit einer LED - bezogen auf den Öffnungswinkel der LED. Um den Helligkeitseindruck einer LED beurteilen zu können, ist daher die Lichtstärke [mcd] nicht das alleinige Merkmal, sondern Öffnungswinkel der LED und Einsatzort müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Lichtstrom [lm]

Der in Lumen (abgekürzt lm) angegebene Lichtstrom gibt an, welche Lichtmenge von einer Lichtquelle erzeugt und "rundherum" abgestrahlt wird. Er ist das Produkt aus der Lichtstärke [mcd] und dem sr-Faktor, einer Maßeinheit, die dem Öffnungswinkel der LED zugeordnet ist. Je kleiner der Öffnungswinkel (und je kleiner der zugehörige sr-Faktor), desto kleiner ist der Lichtstrom. In der Tabelle sind ähnliche Werte des Lichtstroms [lm] mit gleicher Farbe markiert.

Lichtstrom [lm] in Abhängigkeit von Öffnungswinkel und Lichtstärke:

Öffnungswinkel	130°	100°	80°	70°	60°	40°	30°	20°	
sr-Wert	3,6278	2,2444	1,47	1,1363	0,8418	0,3789	0,2141	0,0955	
Lichtstärke	10 mcd	0,036	0,022	0,015	0,011	0,008	0,004	0,002	0,001
	30 mcd	0,109	0,067	0,044	0,034	0,025	0,011	0,006	0,003
	50 mcd	0,181	0,112	0,074	0,057	0,042	0,019	0,011	0,005
	80 mcd	0,290	0,180	0,118	0,091	0,067	0,030	0,017	0,008
	100 mcd	0,363	0,224	0,147	0,114	0,084	0,038	0,021	0,010
	250 mcd	1,008	0,623	0,408	0,316	0,234	0,105	0,059	0,027
	700 mcd	2,539	1,571	1,029	0,795	0,589	0,265	0,150	0,067
	1.200 mcd	4,353	2,693	1,764	1,364	1,010	0,455	0,257	0,115
	2.000 mcd	7,256	4,489	2,940	2,273	1,684	0,758	0,428	0,191
	3.000 mcd	10,883	6,733	4,410	3,409	2,525	1,137	0,642	0,287
	4.000 mcd	14,511	8,978	5,880	4,545	3,367	1,516	0,856	0,382
	5.000 mcd	18,139	11,222	7,350	5,682	4,209	1,895	1,071	0,478
12.000 mcd	43,534	26,933	17,640	13,636	10,102	4,547	2,569	1,146	

Sie Sache mit den "ultrahellen" LEDs

Beim Kauf von LEDs werden Sie häufig auf Bezeichnungen wie "superhell" oder "ultrahell" stoßen. Lassen Sie sich davon nicht verwirren: Es gibt keine verbindliche Definition, in der festgelegt ist, welche Werte eine LED mindestens einhalten muss, um als "ultrahell" oder "superhell" eingestuft werden zu können. LEDs als "ultrahell" oder "superhell" zu bezeichnen, liegt ausschließlich im Ermessen des Herstellers oder Händlers.

Warnhinweis: Nicht reingucken!

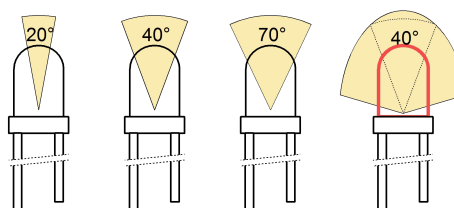
Mal eben die LED in den LED-Tester stecken und anschalten: Das kann bei LEDs mit hoher Lichtstärke [mcd] im wahrsten Sinne des Wortes ins Auge gehen - vor allem, wenn die LED auch noch einen kleinen Öffnungswinkel hat. Daher folgender Tipp: Die LED lieber erst mal mit wenig "mA" versorgen und "vorsichtig" von der Seite gucken.

Gehäuse und optische Eigenschaften

Die Gehäuseausführung einer LED ist keine optische Eigenschaft im eigentlichen Sinne, beeinflusst sie jedoch wesentlich. Üblich sind folgende Ausführungen:

- klar (auch als wasserklar bezeichnet): Der Lichtkegel entspricht dem Öffnungswinkel der LED.
- diffus (milchig oder eingefärbt in der Leuchtfarbe der LED): Die Wirkung ist vergleichbar mit der von Lichtleitern in Modellbahn-Loks. Das Licht wird gestreut, so dass es gleichmäßig verteilt aus dem Gehäuse austritt. Der tatsächliche Öffnungswinkel ist bei diffusen LEDs nicht zu erkennen (und spielt nur in Bezug auf die Helligkeit eine Rolle).

Typische Öffnungswinkel einer 3 mm-LED:



Rechts eine LED mit diffus rotem Gehäuse, bei der das Licht gestreut austritt.

Bauformen

Es gibt eine große Vielzahl verschiedener Bauformen von LEDs. Wir beschränken uns hier auf die Darstellung der Standard-Bauformen, die im Modellbau häufig eingesetzt werden (und die wir im Lieferprogramm haben):

Bedrahtete LEDs

Die LEDs mit integrierten Anschlussdrähten sind sicher am einfachsten zu handhaben und für viele Modellbahn-Anwendungen geeignet. Kleinere Bauformen als die 1,8 mm-LEDs finden wir aktuell jedoch bei keinem Hersteller.

SMD-LEDs

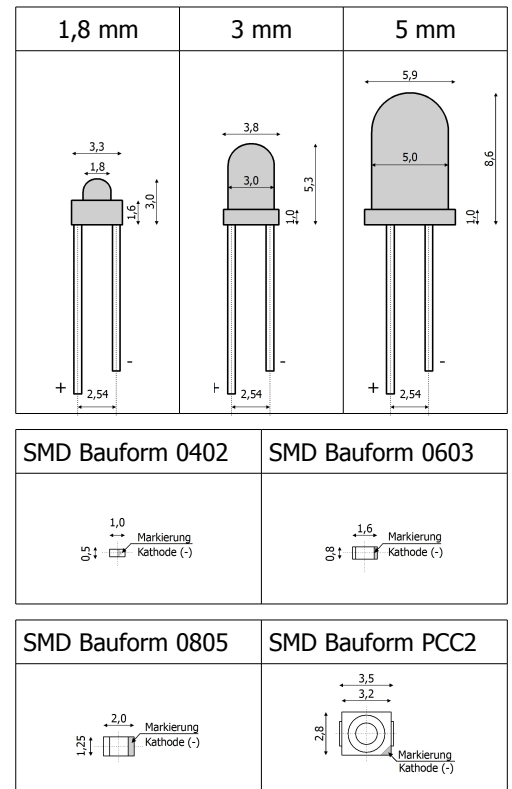
Die Abmessungen der eigentlich für die maschinelle Bestückung gedachten LEDs reichen von gering bis sehr gering. Damit können sie auch in kleinen Modellen für kleine Nenngrößen untergebracht werden. Ihre geringen Abmessungen machen sie jedoch etwas widerspenstig.

Tip: SMD-LEDs montieren

Anlöten der Kabel: Legen Sie die LEDs mit dem Lichtauslass nach unten auf doppel-seitiges Klebeband, das Sie auf eine feste Unterlage geklebt haben. Die Kathode ist markiert. Alternativ können Sie SMD-LEDs mit angelöteten Kupferlackdrähten verwenden, die wegen des hohen Lohnanteils jedoch recht teuer sind.

Montage: Geben Sie etwas Sekundenkleber auf die Stelle, an der Sie die LED befestigen wollen. Drücken Sie die LED mit einer Stecknadel an, bis der Kleber erhärtet ist.

LEDs im Größenvergleich



Hinweis: Die Abmessungen können bei verschiedenen Herstellern oder auf Grund von Toleranzen geringfügig abweichen.

Duo-LEDs

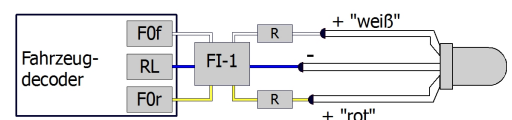
Duo-LEDs vereinen zwei verschiedenfarbige LED-Chips in einem Gehäuse und leuchten – je nach Ansteuerung – in der einen oder der anderen Farbe oder auch in einer Mischfarbe. Die Vorteile liegen auf der Hand: Der Platzbedarf und der Montageaufwand von einer Duo-LED sind geringer als der von zwei einzelnen LEDs.

Für den Einsatz auf der Modellbahn werden z.B. verwendet:

- rot-grüne Duo-LEDs als Anzeige- oder Kontroll-Leuchten (aus/an, belegt/frei, usw.)
- rot-gelbe Duo-LEDs als Anzeigeleuchten, auch mit Verwendung der Mischfarbe "orange" als 3. Farbe
- rot-gelbe oder seit einiger Zeit auch rot-weiße Duo-LEDs als Lokbeleuchtung

3-Bein mit gemeinsamer Kathode (-)

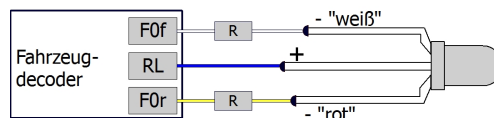
Je nachdem, an welcher Anode die Spannung anliegt, leuchtet die LED in der einen oder anderen Farbe. Sind beide Anoden gleichzeitig mit der Spannungsquelle verbunden, entsteht ein Mischlicht. Bei dieser Bauform ist das längste Beinchen übrigens die Kathode!



Diese "Ur-Form" der Duo-LED kann nicht direkt an einen Fahrzeugdecoder angeschlossen werden, da sie in Bezug auf die Decoderausgänge "falsch" gepolt ist. Für den Anschluss ist daher ein Funktionsinverter FI-1 nötig, der die Polung intern "umdreht".

3-Bein mit gemeinsamer Anode (+)

Je nachdem, an welcher Kathode die Spannung anliegt, leuchtet die LED in der einen oder anderen Farbe. Sind beide Kathoden gleichzeitig mit der Spannungsquelle verbunden, entsteht ein Mischlicht. Bei dieser Bauform ist das längste Beinchen die Anode.

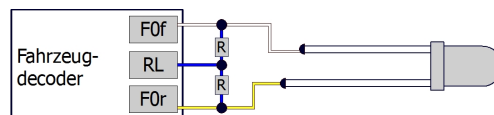


Diese seit einiger Zeit erhältliche LED-Form kann direkt an die Funktionsausgänge eines Fahrzeugdecoders angeschlossen werden.

2-Bein (bipolar)

Je nach Polung leuchtet die LED entweder in der einen oder der anderen Farbe. Um ein Mischlicht zu erzeugen, muss die LED mit Wechselspannung angesteuert werden.

Durch die verschieden langen Anschlüsse wird gekennzeichnet, welche Farbe bei der einen oder anderen Durchflussrichtung leuchtet.



Der Anschluss an die Ausgänge eines Fahrzeugdecoders ist etwas trickreich, da die LED ja nur zwei Anschlüsse hat, die mit drei Decoderanschlüssen verbunden werden müssen.

LEDs mit integriertem Vorwiderstand

Eine LED, die den notwendigen Vorwiderstand bereits "drin" hat, das klingt verlockend, spart es doch lästige Lötarbeiten und das Nachdenken über die Wahl des "richtigen" Vorwiderstands. Die meisten handelsüblichen LEDs dieser Bauart haben jedoch einen Haken: Sie sind für Spannungen von 5 oder 12 V ausgelegt – für typische Modellbahnanwendungen also ungeeignet.

Anders sieht es bei LEDs mit Lampensockeln aus, die speziell als Ersatz für modellbahntypische Glühlämpchen konstruiert wurden. Diese sind z.B. für Spannungen von 12 – 18 V oder 16 – 22 V lieferbar. Anwendungsbeispiele:

	analoge Anlagen	digitale Anlagen
12 – 18 V	Gleichstromanlagen	geregelter Booster bis 18 V
16 – 22 V	Wechselstromanlagen	ungeregelte Booster

Warmweiße LEDs mit Lampensockel

Gewinde- sockel E5,5	Gewinde- sockel E5,5	Bajonett- sockel BA5s	Steck- sockel MS4

Die beiden Versionen mit Gewindesockel E5,5 unterscheiden sich hinsichtlich des Öffnungswinkels:

- "halbkugelförmige" Version: 80 – 100°
- "zylinderförmige" Version: 120 – 140°

LEDs anschließen

Ein bisschen Theorie

"URI" – so die gängige Abkürzung für das Ohmsche Gesetz - ist Grundlage für das Verständnis der Zusammenhänge:

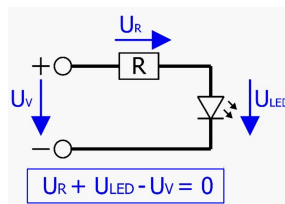
$$U = R \times I$$

Spannung [V] = Widerstand [Ω] x Strom [A]

Die Formel beinhaltet alle wesentlichen Parameter:

1. Spannung (nämlich Versorgungsspannung und Durchlass-Spannung der LEDs)
2. Widerstand (des Vorwiderstandes)
3. Strom, der durch LED und Vorwiderstand fließt

Die zweite kirchhoffsche Regel (die Maschenregel) besagt, dass die Summe aller Spannungen in einer Schaltung gleich "0" ist:



Die Versorgungsspannung und die Durchlass-Spannung der LED(s) sind vorgegeben. Als einzige Variable bleibt der Widerstand: Ihm kommt die Aufgabe zu, die "überschüssige" Spannung "wegzudrücken".

Seriell oder parallel? Was heißt das?

- Parallel: Jede LED wird einzeln mit jeweils eigenem Vorwiderstand angeschlossen.
- Seriell ("in Reihe"): Mehrere LEDs werden aneinandergereiht und bekommen nur einen gemeinsamen Vorwiderstand..

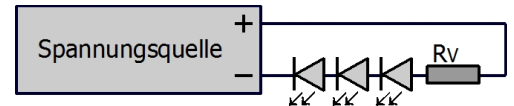
Welche Variante die geeignetere ist, hängt z.B. von der Versorgungsspannung oder dem maximalen Strom der Spannungsquelle (oder des Ausgangs einer Schaltung) ab. Es können auch ganz praktische Erwägungen wie der Verdrahtungsaufwand eine Rolle spielen.

Wie viele LEDs an einen Ausgang?

Das hängt ab von:

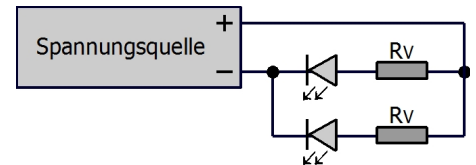
- Der Anschlussart (seriell oder parallel): Dabei schlägt jede "Kette" mit ihrem spezifischen Stromverbrauch zu Buche – unabhängig davon, ob daran eine oder 10 LEDs angeschlossen sind.
- Dem Strom der Kette: Der Strom wird durch den Vorwiderstand begrenzt: Sie haben es in der Hand, ob Sie ihn auf stromsparende 10 mA begrenzen und damit einen Helligkeitsverlust in Kauf nehmen oder ob Sie die volle Helligkeit ausnutzen, dafür aber auch 20 mA verbrauchen.
- Der Versorgungs-Spannung und der Durchlass-Spannung der LEDs: LEDs haben eine vom Typ abhängige spezifische Durchlass-Spannung, bei der sie leuchten. Addieren Sie die Durchlass-Spannungen der LEDs in einer Kette. Das Ergebnis sollte ca. 1 bis 2 V unter der zur Verfügung stehenden Versorgungs-Spannung liegen.

Serieller Anschluss von LEDs:



Die Summe der Durchlass-Spannungen U_F aller LEDs darf die Spannung der Spannungsquelle (z.B. Ausgang einer elektronischen Schaltung) nicht übersteigen.

Paralleler Anschluss von LEDs:



Der Gesamtstrom aller LED-Stränge darf den zulässigen Strom der Spannungsquelle (z.B. Ausgang einer elektronischen Schaltung) nicht übersteigen.

Nie ohne Vorwiderstand! Aber welcher?

Leuchtdioden müssen grundsätzlich über einen Vorwiderstand (oder eine Konstantstromquelle) angeschlossen werden, um den Strom auf den maximal zulässigen Wert von (i.d.R.) 20 mA zu begrenzen.

Der "richtige" Widerstandswert hängt ab von:

- der Höhe der Arbeitsspannung:
bei Gleichspannungsnetzteilen und geregelten Boostern:
Arbeitsspannung = Nennspannung
bei Wechselspannungstrafos und unregulierten Booster:
Arbeitsspannung = 1,4 x Nennspannung
- der Anzahl und der Durchlass-Spannung der in Reihe angeschlossenen LEDs
- dem Strom (und damit der Helligkeit)

"Vorwiderstand?"

Ist nicht nötig, hab ich genau ausgerechnet!"

Klingt überzeugend, überzeugt den wahren Fachmann jedoch nicht. Denn: Rechenwerte und tatsächliche Werte sind nicht dasselbe:

- Beim Ein- und Ausschalten des Trafos ist die Ausgangsspannung immer höher als im Betrieb.
- Mit Toleranzen muss man bei jedem Bauteil und jeder Komponente rechnen, bei den LEDs genauso wie bei den Trafos.

Der Strom ist dann höher als ausgerechnet und fließt ohne Vorwiderstand "ungebremst" durch die LED. Daher: lieber mit...!

Vorwiderstände berechnen

Nachfolgend ein paar Formeln zur Berechnung der Vorwiderstände (für alle, die es genau wissen wollen oder brauchen):

$$n_{LED, max} = \frac{U_B [V]}{U_F [V]} - 1$$

$$erf. R_v [\Omega] = \frac{U_B [V] - (U_F \times n_{LED}) [V]}{I_F [mA] \times 0,001}$$

Wählen Sie den Widerstand nicht zu groß! Die LEDs leuchten sonst nur schwach oder gar nicht.

Abkürzungen:

n_{LED}	Anzahl der LEDs in Reihe
R_v	Vorwiderstand [Ohm]
U_F	Durchlass-Spannung der LED [V]
U_B	Versorgungsspannung [V]
I_F	Strom bei max. Leuchtkraft [mA]

Tipp: Im Internet gibt es diverse "Vorwiderstands-Rechner", die einem die lästige Rechenarbeit abnehmen. Oder Sie verwenden die nachfolgenden Vorwiderstandstabellen.

Vorwiderstands-Tabellen

Bitte berücksichtigen Sie bei der Verwendung der Vorwiderstands-Tabellen folgende Hinweise:

- Bei Verwendung von Wechselspannungstrafos und unregelmäßig Boostern beträgt die Arbeitsspannung das 1,4 fache der Nennspannung.
- Die Werte wurden für eine Durchlass-Spannung der LEDs von 2 bzw. 4 V ermittelt. Die tatsächliche Durchlass-Spannung kann abweichen.
- Wenn Sie weiße oder blaue LEDs mit andersfarbigen LEDs in einer Kette mischen wollen, setzen Sie für eine weiße oder blaue LED 2 andersfarbige LEDs an.
- Die Werte in den Tabellen wurden für einen Strom von 10 mA ermittelt. Durch Verringerung bzw. Erhöhung des Widerstandswertes erreichen Sie eine höhere bzw. geringere Helligkeit. Beachten Sie, dass der Widerstandswert max. die Hälfte des in der Tabelle angegebenen Wertes betragen darf. Sonst wird der maximale Strom von 20 mA überschritten, die LEDs gehen dann kaputt.

** Die physikalische Einheit für den Wert von Widerständen ist "Ohm", abgekürzt mit dem großen griechischen Buchstaben "Ω". Üblich ist auch (z.B. in Schaltplänen) die alphanumerische Darstellung mit den Buchstaben "R" für Ohm und "K" für k(ilo)Ohm als Dezimaltrennzeichen.

Beispiele:

- 10R = 10 R = 10 Ohm
- 1R5 = 1,5 R = 1,5 Ohm
- 10K = 10 K = 10 kOhm
- 1K5 = 1,5 K = 1,5 kOhm

Vorwiderstände für LED-Farben **gelb** | **orange** | **rot** | **grün**

➔ Begrenzung des Stroms auf 10 mA | Angabe der Widerstandswerte in Ohm ("R") bzw. k(ilo)Ohm ("K")**

LEDs pro Kette	Arbeitsspannung									
	12 V	14 V	16 V	18 V	20 V	22 V	24 V	26 V	28 V	30 V
1	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K	2,2 K	2,7 K	2,7 K
2	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K	2,2 K	2,7 K
3	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K	2,2 K
4	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K
5	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K
6	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K
7	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K
8	--	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K
9	--	--	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K
10	--	--	--	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K

Vorwiderstände für LED-Farben **ultrahell grün** | **blau** | **weiß**

➔ Begrenzung des Stroms auf 10 mA | Angabe der Widerstandswerte in Ohm ("R") bzw. k(ilo)Ohm ("K")**

LEDs pro Kette	Arbeitsspannung									
	12 V	14 V	16 V	18 V	20 V	22 V	24 V	26 V	28 V	30 V
1	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K	2,2 K	2,7 K
2	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K	1,8 K	2,2 K
3	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K
4	--	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K
5	--	--	--	--	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K
6	--	220 R	390 R	560 R	820 R	1 K	1,2 K	1,5 K	1,5 K	1,8 K