



Essay zum Thema Leuchtdioden und Vorwiderstände



Leuchtdioden (oder kurz LEDs) sind eine attraktive Alternative zu den originalen Fischertechnik-Lämpchen. Denn sie benötigen deutlich weniger Strom und verlängern damit die Betriebsdauer vor allem Batterie (oder Akku) betriebener Modelle. Neuere Typen haben außerdem eine deutlich höhere Lichtausbeute. Bei der Nutzung sind allerdings ein paar Grundregeln zu beachten, will man die Lebensdauer einer LED nicht vorzeitig beenden.

<i>Inhalt:</i>	Grundlegendes	2*
	Wegweiser im Umgang mit der Tabelle	2*
	Praktische Beispiele	
	Lesen der Tabelle	3*
	Jumbo-LEDs	3*
	Low-current-LEDs	4*
	LED als Blaulicht	4
	Superhelle LEDs	5
	Sicherheitshinweis	5
	Dauerbetrieb mit 75% Strom	6
	Weitere Anwendungen	
	Kaskaden	6*
	Wechselspannung	7*
	Eisenbahnbeleuchtung	7
	LEDs im Kfz-Bereich	7
	Alternatives Ansteuern einer LED	8
	Technische Feinheiten	
	U/I-Kennlinie	9*
	Messen einer LED	10
	Fischertechnik-Leuchtstein	
	Einfassen einer LED	10*
	Alternative Befestigungen	11
	Weitere Tips	11
	Vorwiderstand bei großer Toleranz	12
<i>Anhang:</i>	Tabellenwerk	
	Hinweise	13
	Materialverzeichnis und Literatur	13
	Tabellen	ab 14

Die mit Stern (*) gekennzeichneten Abschnitte sind vorab als Kurzfassung in der [ft:pedia®](https://www.ftpedia.com) veröffentlicht.

Grundlegendes – Leuchtdioden und Vorwiderstände von Anfang an

Oft wird das Thema „Vorwiderstand und LED“ angesprochen, und stets wird dann auf die allgemein gültige Formel zur Berechnung verwiesen:

$$(U_{GES} - U_{LED}) / I_{LED} = R_V \text{ (mind.)} \rightarrow \text{zu wählen i. d. R. den nächst größeren Wert für } R_V$$

Allerdings darf man auch annehmen, daß vor allem Bastler mit eher wenig Kenntnissen in Elektronik sich oftmals diese Frage stellen, wenn sie die Experimentierfreude packt, sich aber mit der korrekten Berechnung des Vorwiderstandes (im folgenden R_V) schwertun. Kompliziert wird die Suche auch dadurch, daß LEDs stets eine individuelle Schwellspannung (im folgenden U_{LED}) hat, die nicht immer bekannt ist.

Trotzdem kann man meist von etwa 2 Volt ausgehen bei einem maximalen Strom von 20 mA. Jedoch ist die Bandbreite an erhältlichen Bautypen mittlerweile recht groß. Hilfreich ist es daher, wenigstens den jeweiligen Typen zu kennen (Bezugsquelle?) und ob es sich um eine „normale“ LED handelt oder um eine aus der „Low-current“-Reihe mit deutlich niedrigerem Strombedarf von maximal 2 mA.

Die meisten LEDs in den gängigen Farben rot, gelb, orange, grün arbeiten gewöhnlich mit maximal 20 mA. Daneben gibt es die neuen LEDs in den Farben blau, weiß und pink, die nicht nur eine höhere U_{LED} haben, sondern oft auch mit deutlich mehr als 20 mA betrieben werden dürfen. Die dritte Gruppe bilden spezielle LEDs in infrarot oder ultraviolett, die zum Teil mit bis zu 100 mA belastet werden dürfen.

Viele LED-Typen sind auch in „superhell“ erhältlich. Diese sind besonders lichtintensiv. **Hierzu Hinweis Seite 5 beachten!**

Darüber hinaus gibt es noch weitere Sonderformen wie Blink-LEDs oder solche mit eingebautem R_V für direkten Anschluß an die Versorgungsspannung. Hierfür ist besser das entsprechende Datenblatt heranzuziehen.

Wegweiser im Umgang mit der Tabelle – den richtigen R_V ablesen

In den Tabellen auf der Seite 12 sind alle gängigen R_V der Reihe E24 (Toleranz 5%) immer in Relation zur „Restspannung“ aufgeführt ($U_{GES} - U_{LED}$). Die jeweils genannten Werte (Volt) beziehen sich auf 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50 und 75 mA.

Ferner kann für weitere Stromstärken der passende R_V leicht abgeleitet werden: z. B. 40 mA \rightarrow R_V -Wert für 20 mA halbieren. Werte ab 1000 Ω stehen in k Ω (also z. B. 2,2 k Ω statt 2200 Ω).

Allerdings habe ich alle Werte jenseits von 15 Volt ausgespart; dieser Bereich ist für Fischertechnik-Modelle zumeist uninteressant. Damit sind gut 99% aller in „unseren Kreisen“ denkbaren LED-Schaltungen abgedeckt. Natürlich kann jeder eine feinere Unterteilung der Tabelle in Eigenregie generieren. Wer das tun möchte, muß sich nur an folgender Formel orientieren:

$$R (\Omega) \times I \text{ (mA)} / 1000 = \text{Restspannung} \\ \text{bzw. } R \text{ (k}\Omega) \times I \text{ (mA)} = \text{Restspannung}$$

Anders jedoch als die klassische Berechnung von R_V bezieht sich diese Formel auf reale Werte eben für R.

Wissen muß man zudem, daß auch eine stabile Versorgungsspannung (im folgenden U_{GES}) geringfügig schwanken kann. Dieser Umstand sollte bei der Auswahl für R_V berücksichtigt werden. Darum empfehle ich für Dauerbetrieb immer den jeweils nächst höheren R_V . Das betrifft vor allem Reihenschaltungen mit LEDs, bei denen die addierten U_{LED} identisch sind mit U_{GES} oder geringfügig größer als diese (beachte hierzu auch das Kapitel auf Seite 9 ff).

Vorsichtshalber sollte also wenigstens ein kleiner R_V gesetzt werden. Dieser könnte nämlich in bestimmten Fällen rein rechnerisch entfallen.

Anmerkung: Alle in den folgenden Beispielen genannten U_{LED} sind auch als solche zu verstehen; jede LED hat letztlich *ihre* individuelle Schwellspannung!

Beispiel 1: An einer Spannung von 9 Volt sollen zwei in Reihe geschaltete weiße LEDs (je 3,85 V/ 20 mA) betrieben werden.

mA	15	20	30	50
Ω			V	
47	0,7	0,9	1,4	2,4
51	0,8	1,0	1,5	2,6
56	0,8	1,1	1,7	2,8
62	0,9	1,2	1,9	3,1
68	1,0	1,4	2,0	3,4
75	1,1	1,5	2,3	3,8
82	1,2	1,6	2,5	4,1
91	1,4	1,8	2,7	4,4
100	1,5	2,0	3,0	5,0

Annotations for the table:
 - max. zulässiger Strom (mA)
 - nächst höherer Wert der Restspannung (V)
 - R_V (Ω) mind.
 - sicherer R_V (Ω)

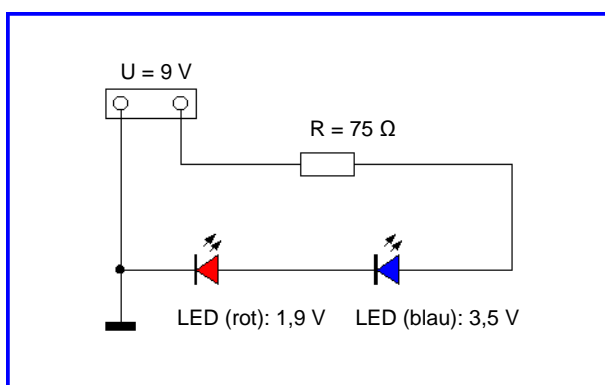
Lesen der Tabelle

Ergebnis: Die Restspannung jenseits der LED (im folgenden U_{REST}) beträgt hier 1,3 Volt. Aus der Tabelle kann nun der nächst höhere Wert für R_V bei 1,4 Volt – also 68 Ω – entnommen werden. U_{GES} darf aber in diesem Beispiel nicht allzu groß schwanken. Deshalb ist U_{REST} vor allem bei nicht stabilisierter U_{GES} eher großzügig zu bemessen und für R_V dann 82 Ω oder höher anzusetzen.

Vermeiden sollte man darüber hinaus eine Mischung von LEDs verschiedener Stromstärken. Denn die maximale Stromstärke orientiert sich immer an dem schwächsten Glied einer solchen Kette.

Vor allem Low-current-LEDs können dabei schnell kaputt gehen. Eine Kombination unterschiedlicher Farben derselben Baureihe ist jedoch ohne weiteres zulässig.

Beispiel 2: An einer Spannung von 9 Volt sollen zwei superhelle „Jumbo“-LEDs* (blau und rot/ je 50 mA) im maximal zulässigen Bereich (also bis 50 mA) betrieben werden.



mA	15	30	50
Ω		V	
47	0,7	1,4	2,4
51	0,8	1,5	2,6
56	0,8	1,7	2,8
62	0,9	1,9	3,1
68	1,0	2,0	3,4
75	1,1	2,3	3,8
82	1,2	2,5	4,1
91	1,4	2,7	4,4

Annotations for the table:
 - max. zulässiger Strom (mA)
 - nächst höherer Wert U_{REST} (V)
 - R_V (Ω) mind.

LED-Schaltung „Jumbo“

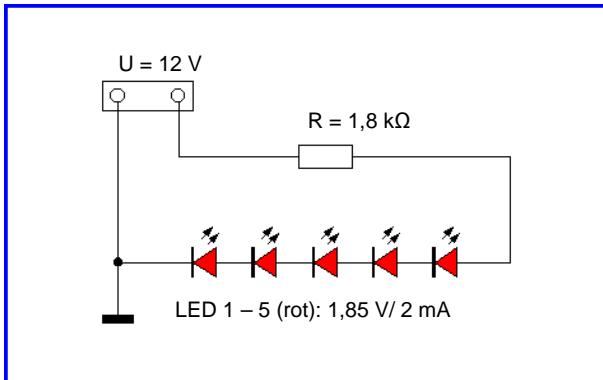
Ergebnis: U_{REST} beträgt hier 3,6 Volt ($9 - 3,5 - 1,9$). In der Tabelle finden wir bei 3,8 Volt für R_V den Wert 75 Ω , mit dem die zwei LEDs noch betrieben werden dürfen. Allerdings fließen hier dauerhaft etwa 48 mA. Ein sicherer Wert wäre daher auch in diesem Beispiel eher 82 Ω oder mehr.

Ausschnitt Tabelle

*) „Jumbo“-LED: extra große Bauform mit 8 bis 10 mm Durchmesser und mehr

(Jumbo-LED „superhell“: unbedingt Hinweis Seite 5 beachten!)

Beispiel 3: An einer Spannung von 12 Volt sollen fünf in Reihe geschaltete rote Low-current-LEDs (1,85 V/ 2 mA) betrieben werden.



mA	0,5	1	2
$\text{k}\Omega$	V		
1,0		1,0	2,0
1,1		1,1	2,2
1,2		1,2	2,4
1,3		1,3	2,6
1,5		1,5	3,0
1,6		1,6	3,2
1,8		1,8	3,6
2,0	1,0	2,0	4,0

max. zulässiger Strom (mA)

nächst höherer Wert U_{REST} (V)

R_V ($\text{k}\Omega$) mind.

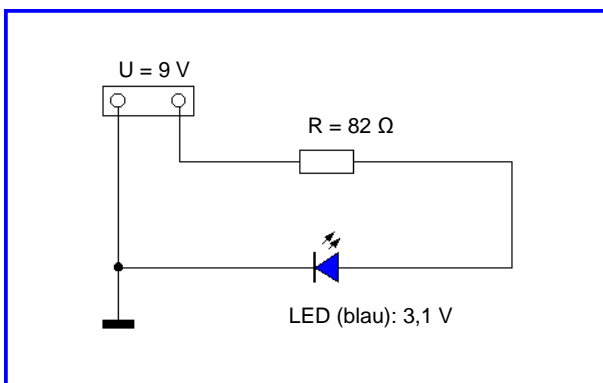
LED-Schaltung „Low-current“

Ergebnis: U_{REST} beträgt 2,75 Volt. Der Tabelle kann der nächst höhere Wert für R_V bei 3 Volt entnommen werden. Weil sich aber Schwankungen von U_{GES} in diesem

Ausschnitt Tabelle

Bereich deutlicher auswirken, ist natürlich sicherheitshalber der nächst höhere Wert für R_V – nämlich 1,8 $\text{k}\Omega$ – anzusetzen.

Beispiel 4: An einer Spannung von 9 Volt soll eine blaue Leistungs-LED (3,1 V/ 100 mA) mit $\frac{3}{4}$ der Gesamtleistung – also 75 mA – betrieben werden. Diese Kombination soll zweimal als (Blaulicht) in ein FT-Feuerwehrfahrzeug eingebaut werden.



mA	15	50	75	
Ω				
47	0,7	4	3,5	1
51	0,8	6	3,8	1
56	0,8	3	4,2	1
62	0,9	1	4,7	1
68	1,0	1	5,1	1
75	1,1	1	5,6	1
82	1,2	1	6,2	2
91	1,4	1	6,9	2
100	1,5	1	7,5	2

$\frac{3}{4}$ des max. zul. Stroms (mA)

nächst höherer Wert U_{REST} (V)

Fußnote – Watt

R_V (Ω) mind.

LED-Schaltung „Blaulicht“

Ergebnis: U_{REST} beträgt hier 5,9 Volt. Der Tabelle kann der nächst höhere Wert für R_V bei 6,2 Volt – also 82 Ω – entnommen werden. Zu beachten ist hier aber vor allem die Fußnote [2], die darauf hinweist, daß es sich in dieser Schaltung um einen Leistungswiderstand handelt – nämlich 1 Watt (W).

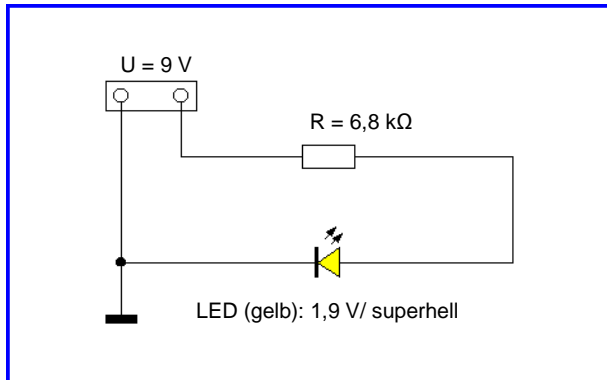
Ausschnitt Tabelle

ist. Exakt gerechnet kommen wir mit dem gefundenen R_V von 82 Ω auf rund 72 mA und 425 mW. Rein rechnerisch würden also 0,5 Watt völlig ausreichen. Allerdings erkennen wir auch gleichzeitig den Grenzbereich; für Dauerbetrieb wäre also ein R_V mit 1 W besser. Alternativ ginge auch eine weitaus geringere Versorgungsspannung wie z. B. nur 6 Volt: mit 39 $\Omega \rightarrow$ 215 mW.

Vergleichen wir zudem die unmittelbar benachbarten Werte, dann finden wir beide Fußnoten – also [1] = 0,5 W und [2] = 1 W. Diese Schaltung stellt damit einen sogenannten Grenzfall dar, wo man zunächst nicht genau weiß, welche Wattzahl richtig

Und weil solche Lichteffekte grundsätzlich asynchron ablaufen, muß hier jeder Kanal natürlich für sich betrachtet werden. Insgesamt benötigen wir also beide Bauteile je zweimal.

Zusatztip 1 – Superhelle* LEDs: LEDs dieses Bautyps können auch „wie normal“ genutzt werden, um damit z. B. Strom sparende Komponenten für Batterie betriebene Modelle zu konstruieren. Sie eignen sich auch bestens für Anzeigezwecke in Kleinmodulen jeglicher Art. Anstatt mit dem üblich zulässigen Strom von 20 mA wird die betreffende LED in dieser Variante mit nur etwa 1 bis 2 mA betrieben. ***) Sicherheitshinweis beachten!**



LED-Schaltung „superhell“

Ergebnis: U_{REST} beträgt hier 7,1 Volt. Die Tabelle fungiert jedoch eher als Anhaltspunkt für R_V und nennt als nächst höheren Wert 7,5 kΩ. Die Auswahl ist in diesem Fall also breiter gefächert, so daß ein Widerstand sowohl nach oben als auch nach unten abweichen kann. Hier empfehle ich ausnahmsweise, die optimale Helligkeit der LED mit verschiedenen Werten für R_V auszuloten.

Im dargestellten Beispiel habe ich für R_V 6,8 kΩ angesetzt. Korrekt nachgerechnet ergibt das ziemlich genau 1 mA. In einer

mA	0,5	1	2
kΩ	V		
4,7	2,4	4,7	9,4
5,1	2,6	5,1	10,2
5,6	2,8	5,6	11,2
6,2	3,1	6,2	12,4
6,8	3,4	6,8	13,6
7,5	3,8	7,5	15,0
8,2	4,1	8,2	16,4
9,1	4,6	9,1	18,2
10	5,0	10,0	20,0

unterer Richtwert des Stroms (mA) – es darf natürlich mehr sein!

nächst höherer Wert U_{REST} (V)

Richtwert R_V (kΩ)

Ausschnitt Tabelle

ähnlich gearteten Variante (als Signalanzeige für den Nachbau des h4-GB) habe ich eine rote LED (1,6 V/ superhell) mit 4,7 kΩ vorgespannt; hier fließen bei 9 Volt etwa 1,6 mA.

Ein wesentlicher Vorteil superheller LEDs gegenüber „Low-current“ liegt übrigens in der größeren Robustheit; es dürfen stets mehr als „nur“ 2 mA fließen. Damit ist das Anwendungsspektrum deutlich größer als mit herkömmlichen LEDs. Allerdings gelten für LEDs dieses Bautyps besondere Sicherheitsbestimmungen!

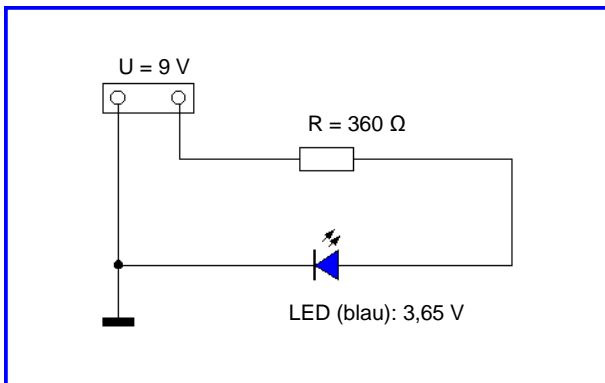
Zusatztip 2 – Sicherheitshinweis: Und sollte es doch gewünscht sein, die volle Lichtausbeute superheller LEDs zu nutzen, so kann man natürlich auch hier bis an die zulässige Belastungsgrenze des jeweiligen Bauteils herangehen. Denn diese LEDs sind ja speziell auf eine große Lichtausbeute ausgelegt. Vor allem im Großverbund (vergl. hierzu auch Beispiel S. 6 – „Kaskaden“) lassen sich damit interessante Lichteffekte erzielen.

Wichtig: Bei der Handhabung (z. B. in der Entwicklungsphase) und vor allem im späteren Gebrauch (beim Spielen oder auf Modellausstellungen) ist konsequent darauf zu achten, daß man NIEMALS direkt in den vollen Strahl einer superhellen LED blickt oder daß andere Personen davon in den Augen getroffen werden können. Das Licht dieser LEDs ist bauartlich bedingt zum Teil äußerst aggressiv. Es besteht akute Gefahr einer irreversiblen

NETZHAUTBESCHÄDIGUNG

im Auge! Dasselbe betrifft übrigens auch einige Jumbo-LEDs! Wichtige Informationen hierzu finden sich im jeweiligen Datenblatt einer LED.

Zusatztip 3 – Dauerbetrieb: Im Normalfall wird eine LED meist selten im „Grenzbereich“ – also am Limit von z. B. 20 mA – betrieben. Um das Bauteil vor allem im Dauerbetrieb zu schonen, empfehle ich hierfür eher einen Wert von etwa 75% des maximal zulässigen Stroms.



LED-Schaltung „75 Prozent“

Ergebnis: Ich habe die Tabellen dahingehend ausgelegt, diese Option zu berücksichtigen. Für die meisten Fälle können also die Werte für R_V direkt entnommen

mA	2	15
Ω		
220		3,3
240		3,6
270		4,1
300		4,5
330		5,0
360		5,4
390		5,9
430		6,5
470		7,1

75% des zulässigen Stroms (mA)

nächst höherer Wert U_{REST} (V)

analoger R_V (Ω)

Ausschnitt Tabelle

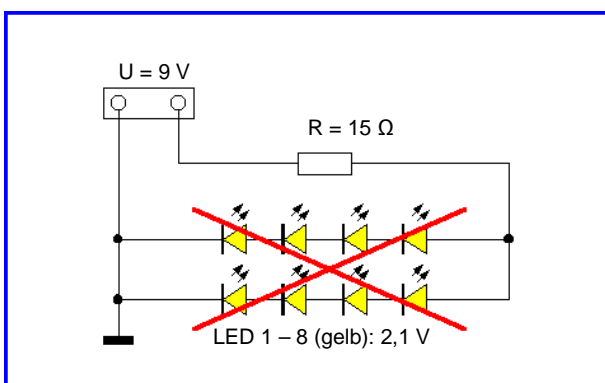
werden. Im dargestellten Beispiel gilt: bei U_{REST} von 5,35 Volt \rightarrow nächst höherer Wert = 360 Ω . Und weil die Toleranz hier größer ist, gingen auch 330 Ω oder 390 Ω .

Weitere Anwendungsbeispiele – auch „außerhalb“ von Fischertechnik

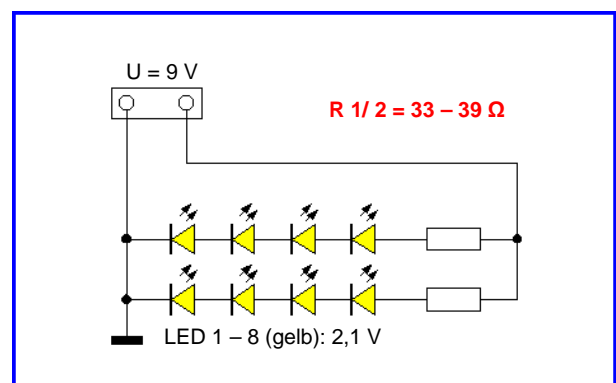
Kaskaden – mehrere LED-Ketten an einer gemeinsamen Spannungsquelle: Will man eine größere Anzahl LEDs betreiben, um z. B. ein Kirmesmodell mit vielen bunten Lichteffekten auszustatten, so kommt man ja vielleicht auf die Idee, hier mit nur einem R_V zu arbeiten. Bezogen z. B. auf die doppelte Leistung von 40 mA käme man bei 0,6 Volt U_{REST} auf rechnerisch 15 Ω insgesamt für dann zwei LED-Ketten.

Doch genau darin liegt die Crux. Denn aufgrund diverser Streuungen zwischen den beiden Ketten wird die Sache äußerst riskant. Und sollte auch nur eine LED ausfallen oder der Kontakt irgendwo unterbrochen, so würde der nicht betroffene Zweig sofort mit einem zu hohen Strom belastet und diese LEDs schnell zerstören.

Natürlich muß hier jeder einzelne Zweig separat betrachtet und immer mit einem eigenen R_V wie gehabt versorgt werden. Ich habe deshalb ein prägnantes Beispiel nebeneinander dargestellt. Die Tabelle hilft natürlich gleichermaßen. Somit gilt: pro 4er-Reihe mindestens 33 bis 39 Ω .



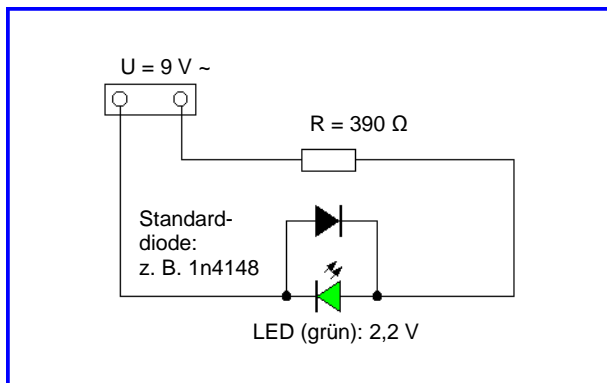
LED-Schaltung „Kaskade falsch“



LED-Schaltung „Kaskade richtig“

Betrieb einer LED an Wechselspannung: Hierbei ist zu berücksichtigen, daß LEDs stets eine verhältnismäßig geringe Sperrspannung (also verkehrt herum gepolt) haben und bei falscher Polung (bei Wechselspannung ja unvermeidlich) schnell kaputt gehen.

Abhilfe schafft eine antiparallel gesetzte normale Diode (z. B. 1n4148), so daß der Strom ungehindert in beide Richtungen fließen kann. Alternativ ginge auch eine zweite LED für die Gegenrichtung, was so bei ZweifarbleDs (z. B. als Polaritätsanzeige) stets automatisch geschieht.



mA	2	15	20
Ω	V		
220	3,3	4,4	
240	3,6	4,8	
270	4,1	5,4	
300	4,5	6,0	
330	5,0	6,6	
360	5,4	7,2	
390	5,9	7,8	
430	6,5	8,6	
470	7,1	9,4	

max. zulässiger Strom (mA)

nächst höherer Wert U_{REST} (V)

R_V (Ω) mind.

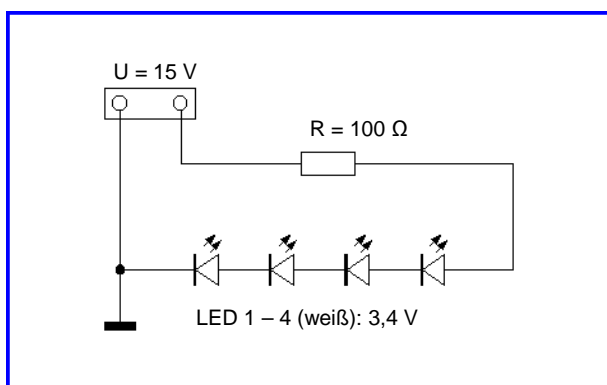
LED-Schaltung „Wechselspannung“

Als Faustregel gilt die Tabelle gleichermaßen. Die Lösung nennt für 6,8 Volt U_{REST} den nächst höheren Wert für R_V , also 360 bzw. 390 Ω . Etwaige Feinheiten bezüglich Impulsstroms u. ä. in dieser Betriebsart lasse ich mal außen vor.

Ausschnitt Tabelle

Ferner ist zu beachten, daß die Leistung des R_V auf den geringfügig höheren Strom der zweiten Diode (0,7 V) abgestimmt sein muß, sofern hier keine zweite LED eingesetzt wird. Für den Gesamtstrom sind ggf. +5 mA pauschal hinzuzurechnen.

Eisenbahnbeleuchtungen mit LEDs: Neben Fischertechnik habe ich auch dieses Thema mit aufgegriffen. Denn mal abgesehen von der meist höheren Versorgungsspannung gibt es nämlich kaum Unterschiede.



LED-Schaltung Eisenbahn“

Als Beispiel habe ich eine Reihe weißer LEDs (3,4 V/ 20 mA) betrieben an 15 Volt U_{GES} . U_{REST} beträgt 1,4 Volt; als nächst höheren Wert für R_V erhalte ich 75 Ω . Allerdings wäre das extrem knapp, so daß hier schon wegen der größeren Toleranzen von U_{GES} ein höherer Wert für R_V eingesetzt werden muß – z. B. 100 Ω .

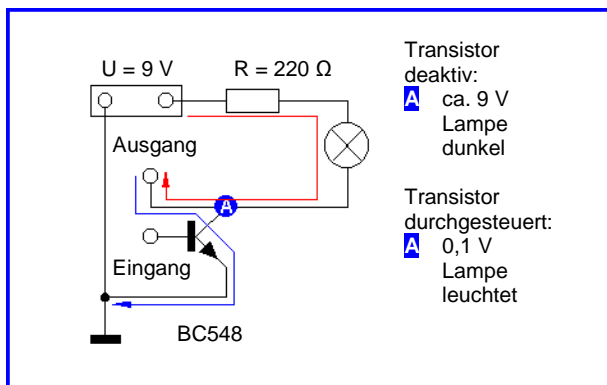
LEDs im Kfz-Bereich: LEDs in Kraftfahrzeugen sind normalerweise kein Problem. Man muß aber wissen, daß die Spannungen hier erheblich schwanken können – vor allem in Altfahrzeugen. Entscheidend ist die Leistung des jeweiligen Generators (im Volksmund „Lichtmaschine“), dessen Ladespannung meist 13,8 Volt beträgt. Ein jeglicher R_V sollte also für eine sehr große Toleranz von U_{GES} ausgelegt sein, sofern an der LED keine stabilisierte Spannung anliegt. Ansonsten gelten die Tabellen auch für den Kfz-Bereich.

Wichtig: Die Nennspannung im Lkw beträgt üblicherweise 24 statt 12 Volt.

Alternatives Ansteuern einer LED: Traditionell wird ja eine LED nebst R_V stets zwischen dem Kollektor eines Transistors bzw. dem Ausgang eines Treiber-ICs und dem gegenüberliegenden Pol der Versorgungsspannung angeschlossen und betrieben. In bestimmten Situationen kann genau das aber ein Nachteil sein. Gerade mit Blick auf den Nachbau der FT-„Silberlinge“ stößt eben diese klassische Form der Betriebsart an eine technische Grenze.

Gemeint ist der Einsatz einer LED im Verbund mehrerer Elemente – z. B. als Modul oder Steuereinheit. Anders nämlich als in reinen Endstufen stehen nach einer LED-Steuereinheit noch zahlreiche Komponenten, die aus dem beteiligten Treiber einen Steuerstrom ziehen.

Variante A – klassisch mit Lämpchen wie in den originalen FT-„Silberlingen“:



Links sehen wir das stark vereinfachte Prinzip, wie es aus allen FT-„Silberlingen“ bekannt ist. Der Ausgang führt wahlweise 0- oder 1-Signal. Doch der verhältnismäßig geringe Strom, der fürs 1-Signal durch die Lampe fließt, ist dabei völlig unkritisch, so daß sie trotzdem dunkel bleibt.

Die rote und die blaue Linie zeigt jeweils den Stromfluß bei 0 und 1, um die erforderlichen Signale zu generieren.

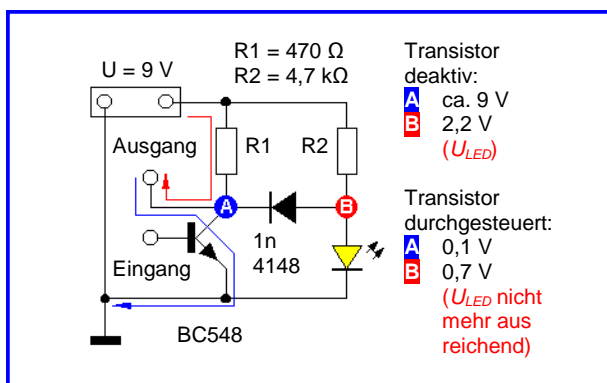
Signalanzeige mit Lampe

Ergänzend sind rechts daneben die ungefähren Spannungen für einen gedachten Punkt A angegeben, wie sie jeweils bei deaktivem bzw. durchgesteuertem Transistor dem Ausgang zugeführt werden.

Anmerkung: In Anlehnung an die moderne Digitaltechnik beziehe ich mich hier für die Benennung von 0- und 1-Signal ausschließlich auf die positive Logik. Da sich alle originalen FT-„Silberlinge“ aber mit negativer Logik definieren, müßte ich die beiden Grafiken viel zu unterschiedlich gestalten. So etwas wäre kontraproduktiv und letztlich unübersichtlich.

Im nächsten Fall habe ich dieses Schaltprinzip dahingehend abgewandelt, um ein brauchbares Ergebnis auch mit einer LED zu erzielen.

Variante B – modifiziert mit LED wie z. B. in den Nachbauten der FT-„Silberlinge“:



Die Herleitung dieser Schaltung resultiert aus dem Prinzip des vorigen Beispiels. Sie unterscheidet sich jedoch grundlegend in der Anzahl der Bauteile sowie in der Tatsache, daß die LED hier nur leuchtet, solange der Transistor deaktiv ist.

Eine am Kollektor angeschlossene Lampe leuchtet hingegen nur dann, wenn der Transistor durchsteuert.

Signalanzeige mit LED

Auch hier sind ergänzend rechts daneben die ungefähren Spannungen angegeben, wie sie jeweils bei deaktivem bzw. durchgesteuertem Transistor dem Ausgang zugeführt werden. Und um die Sache plastischer darzustellen, habe ich hier Werte für zwei gedachte Punkte (A und B) benannt, die natürlich in jeder x-beliebigen Schaltung anders ausfallen können.

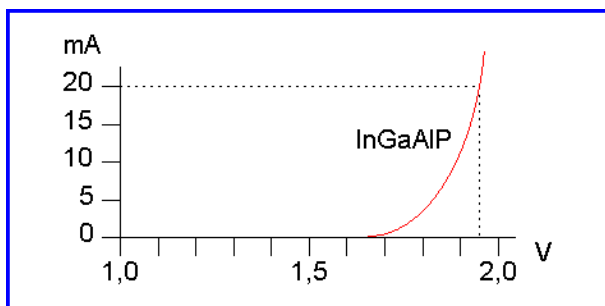
Der wesentliche Unterschied liegt jedoch in den zwei Wegen, die das 1-Signal läuft. Durch die zusätzliche Diode wird die LED nämlich entkoppelt und gleichzeitig sichergestellt, daß das geforderte 1-Signal am Ausgang auch bis auf das Maximum von (zumindest theoretisch) 9 Volt ansteigen kann. Würde die LED allerdings so angeschlossen wie die Lampe aus dem vorigen Beispiel, dann bringt ein abgenommenes 1-Signal am Ausgang die LED minimal zum Leuchten!

Übrigens: Dieses Schaltprinzip habe ich bereits in mehreren Modulen wie z. B. den Nachbauten der FT-„Silberlinge“ eingesetzt; es funktioniert dort einwandfrei. Warum das so ist, zeige ich im nächsten Kapitel.

Technische Feinheiten – warum LEDs manchmal nicht funktionieren

U/I-Kennlinie einer LED: Testreihen mit verschiedenen LEDs zeigen, daß eine LED immer auch eine Mindestspannung benötigt, um minimal zu leuchten. Diese Mindestspannung liegt in etwa bei 80% von U_{LED} . Der maximal zulässige Strom einer LED hat darauf zunächst keinen Einfluß.

Der Grund hierfür liegt in der Arbeitsweise eines Halbleiterkristalls. Bei sehr geringer Spannung (z. B. $U = 1,5$ V für Batterien) kann noch kein Strom fließen. Erst bei höherer Spannung werden ausreichend freie Elektronen aus dem inneren Kristallgitter des Halbleitermaterials gelöst, so daß ein Strom in der LED fließen kann.



typische U/I-Kennlinie einer LED

Das Diagramm (s. Kingbright Datenblatt, Teile-Nr.: L-59SURKSGC-CA, S. 3) zeigt deutlich einen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom an einer typischen

LED. Das Buchstabenkürzel gibt zudem an, aus welchen Elementen der Halbleiter besteht (u. a. Indium – In). An der relativ steilen Kurve ist nun sehr leicht zu erkennen, warum eine LED auch immer einen R_V zur Strombegrenzung benötigt.

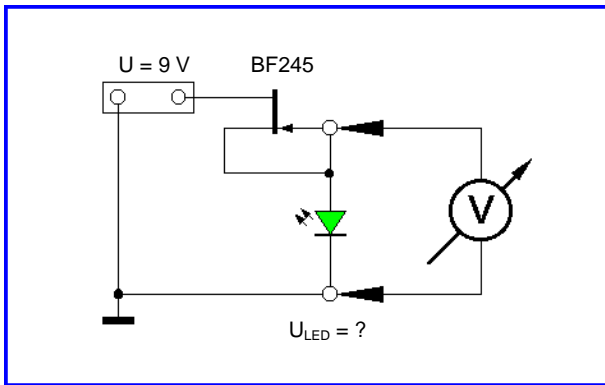
Das bedeutet natürlich im Umkehrschluß, daß eine LED nicht mehr ausreichend mit Strom versorgt wird, falls z. B. drei weiße LEDs in Reihe mit je 3,85 Volt U_{LED} (vergl. Beispiel 1 auf Seite 3) mit einer Spannung von 9 Volt versorgt würden. Die U_{LED} aller drei LEDs beträgt in diesem Fall zusammen 11,55 Volt. U_{GES} von 9 Volt ist hierfür mit knapp 78% viel zu gering; die LEDs leuchten nicht.

Ein anderes Beispiel hierzu ist der Betrieb einer LED (grün/ 2,2 V) an einer einzelnen Batterie mit 1,5 Volt. Auch diese Kombination kann nicht funktionieren. U_{GES} liegt bei ca. 68% von U_{LED} ; die LED leuchtet nicht.

Messen einer LED – die richtige Schwellspannung (U_{LED}) ermitteln: Wenn man nicht (mehr) genau weiß, wie hoch U_{LED} ist (unbekannte Herkunft?), so kommt man nicht umher, diesen Wert irgendwie herauszufinden.

Natürlich gibt es hierzu diverse (und professionelle) Meßverfahren. Diese jedoch stehen einem Hobbyelektroniker zumeist nicht zur Verfügung. Also müssen wir uns einer Methode bedienen, die zwar nicht unbedingt 100%-ig ist, aber doch relativ brauchbare Ergebnisse erzielt.

Kernpunkt ist eine sogenannte Konstantstromquelle, die es sicher in verschiedenen Versionen gibt. Eine äußerst elegante mit nur einem einzigen Bauteil habe ich in einem Fachbuch (Alfred Härtl, „Optoelektronik in der Praxis“, S. 43) gefunden.



Meßanordnung – U_{LED}

Realisiert wird diese Konstantstromquelle mit einem Feldeffekttransistor (JFET). Anders nämlich als ein passiver Widerstand, arbeitet ein Transistor aktiv und regelt den Strom weitgehend unabhängig von U_{GES} . Übertragen auf „normale“ Anwendungen wäre diese Form allerdings recht teuer.

Ich habe diese Meßmethode selbst eingehend ausprobiert. Es fließen durchweg etwa 14 – 15 mA. Und das bleibt auch dann erhalten, wenn U_{GES} in großen Toleranzen schwankt. Nur für Low-current-LEDs muß die Vorschaltung geändert werden, damit der Strom auf 2 mA begrenzt bleibt.

Kurioser Weise mußte ich dabei feststellen, daß die U_{LED} in manchen Fällen stark abweicht von den Originaldaten zu einer LED. Andere wiederum stimmten bis auf wenige mV mit den Angaben überein. Und eine gemessene LED entpuppte sich gar als eine mit eingebautem R_V .

Letztlich muß man jedoch bedenken, daß sogenannte „Hausrezepte“ wie das hier gezeigte generell Grenzen haben.

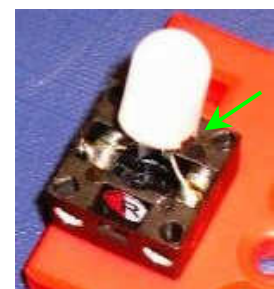
Leuchtdioden und FT-Leuchtsteine – mit und ohne Lampenfassung

Leuchtdioden haben den Vorteil, daß sie gegenüber normalen Lämpchen weitaus weniger Strom benötigen. So können bereits mit kleinen Versorgungsspannungen (z. B. der 9V-Block) interessante und vielseitige Lichteffekte erzielt werden.

Ein entscheidender Nachteil jedoch ist, daß LEDs immer mit einem R_V betrieben werden müssen. Das bedeutet natürlich für jegliche Anwendung einen gewissen Mehraufwand, und LEDs sind stets auf eine korrekte Polung angewiesen. Da verwundert es nicht, wenn Fehlschaltungen, die auch mir in der Vergangenheit unterlaufen sind, eine LED nicht verzeiht. Vor allem an Spezial-Ausführungen kann so was schnell ins Geld gehen.

An einem konkreten Beispiel aus meiner Sammlung zeige ich, wie man eine LED in einen FT-Leuchtstein sauber einfaßt und diesen korrekt anschließt. Übrigens: Die hier vorgestellte LED ist natürlich purer Luxus (8 mm, 360° Abstrahlwinkel, rot – Conrad-Nr.: 184433 für 2,49 € pro Stück).

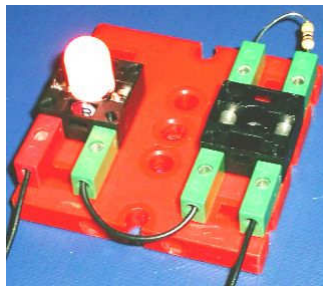
In einen Leuchtstein werden wie rechts zu sehen zunächst zwei einzelne Drähte (keine Litze!) eingelötet und danach auf ca. 5 mm gekürzt – ebenso die Anschlüsse der LED. Der Kathodenan- **FT-Leuchtstein** schluß kann bei Bedarf mit einem Edding



markiert werden (grüner Pfeil). Danach wird alles vorsichtig miteinander verlötet (**unbedingt Temperatur beachten!**).

Um später alle LEDs leichter unterscheiden zu können, kann in den Freiraum ein kleiner Aufkleber (mit Pinzette) eingefügt werden. Abschließend wird die fertig verlötete LED leicht drehend nach unten gedrückt (hält ab jetzt von alleine) und möglichst mittig ausgerichtet. Und eine Rastleuchtkappe passt auch noch drüber!

Im Bild rechts zu sehen ist die einfachste Möglichkeit, wie LED und Widerstand miteinander zu kombinieren sind. Der hier gezeigte R_V

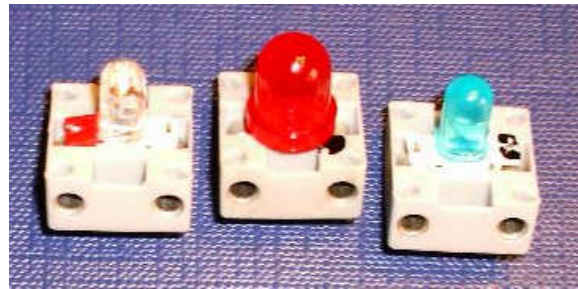


Anwendung

ein Beispiel dafür sein, wie sowas aussehen kann; die Ausgestaltung dessen kann in vielfältiger Weise geschehen.

Natürlich gibt es einfachere Möglichkeiten, LEDs auch anders in Leuchtsteine einzufassen: Die meist schlecht biegsamen Anschlüsse einer LED werden auf gut 5 mm verkürzt und mit dünnen Drähten verlötet (**Temperatur beachten!**). So vorbereitet, wird die LED in eine sauber entkernte FT-Lampfassung (Lämpchen kaputt – **Vorsicht: Glassplitter!**) eingeführt und ggf. verklebt. Danach werden die unten herausschauenden Drähte nach oben durch die seitlichen Löcher der Fassung gefädelt (lange Drahtüberstände entfernen).

Weitere Tips: Will man generell verstärkt mit LEDs arbeiten und bauen, so empfehle ich hierfür die Anschaffung zusätzlicher FT-Leuchtsteine und ggf. separater FT-Lampfassungen (letztere derzeit noch nicht möglich).



Verschiedene LEDs in FT-Leuchtstein
(mit und ohne FT-Lampfassung)



IR-LED mit antiparalleler Diode
(als Sicherung gegen Falschpolung)

Generell ließen sich Widerstände in modernen (äußerst kleinen) Bauformen auch direkt in den Leuchtstein mit einarbeiten. Allerdings entfällt so die Option, mehrere LEDs als Kaskade – also in Reihenschaltung – an eine Versorgungsspannung anzuschließen (vergl. Beispiel S. 6). Denn so bräuchte man deutlich weniger Widerstände. Außerdem kann jede LED-Schaltung den gewünschten Erfordernissen optimal angepaßt werden.

Eine Variante mit eingearbeitetem R_V ist allerdings dann vorzuziehen, falls der Anwender (vielleicht ein junger Schüler) nicht ausreichend bewandert ist im Umgang mit LEDs. Immerhin könnte der R_V auch mal vergessen werden.



LED mit neuen Drähten
(& entkernter FT-Fassung)



eingefaßte LED
(eine Seite „eingefädelt“)



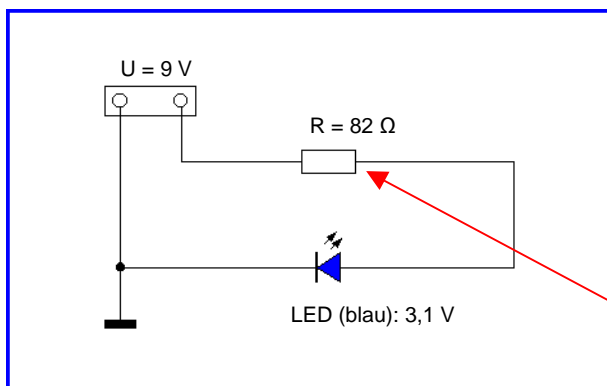
LED fertig
(Kathode ist hier markiert)



IR-Transistor
(Pendant zur obigen IR-LED)

Alternativen – wenn die Toleranz auch groß sein darf: Sicher ist es nicht immer erforderlich, alle eingesetzten LEDs einer Schaltung oder eines Modells mit demselben Strom bzw. exakt derselben Helligkeit zu betreiben. Ist es also unerheblich, jedesmal diese Option zu erfüllen, dann ist die hier gezeigte Tabelle eine gute Alternative. Das gilt natürlich auch, wenn man keine großen Mengen an R_V für jede erdenkliche Version ständig vorhalten will.

Doch anstatt einem jeglichen R_V unter Berücksichtigung eines bestimmten Stroms „seine“ Restspannung zuzuordnen, habe ich diese Tabelle leicht modifiziert. Aufgeführt sind hier Spannungsbereiche für U_{REST} in Abschnitten zu 1 je Volt. Für alle R_V der Reihe E24 (ohne Zwischenwerte) ist somit die jeweils maximale Stromstärke (mA) angegeben. Wie diese Tabelle zu lesen ist, zeige ich hier anhand von Beispiel 4 „Blaulich“ von Seite 4.



Ω	U.Rest	
	4 - 5	5 - 6
18		
22		
47		
56	89,3	2
68	73,8	1
82	60,9	1
100	50,0	1

mA (max)

U_{REST} – 5 bis 6 Volt

analoger R_V

gewünschte Stromstärke (mA) – gem. Beispiel 75 mA; Fußnoten identisch → hier also 1 Watt

Lesen der Tabelle „große Toleranz“

Zur Erinnerung: An einer Spannung von 9 Volt soll eine blaue Leistungs-LED (3,1 V / 100 mA) mit $\frac{3}{4}$ der Gesamtleistung – also 75 mA – betrieben werden.

Ergebnis: U_{REST} beträgt 5,9 Volt. Damit ist in der Tabelle die Spalte „5 – 6“ relevant. Hier suchen wir den mA-Wert, der dem geforderten Wert am nächsten kommt, jedoch niemals die erlaubte Stromstärke überschreiten darf.

Wie auch in den anderen Tabellen finden wir den entsprechenden R_V in der Spalte ganz links außen – also 82 Ω . Zu beachten ist auch hier wieder die Fußnote [2], die darauf hinweist, daß es sich in dieser Schaltung um einen Leistungswiderstand handelt – nämlich 1 Watt (W).

Insgesamt ist diese Tabelle allerdings viel größer aufgebaut. Feines Abstimmen, das ja nicht immer gefordert ist, ist damit eher nicht machbar. Ferner habe ich zur Veranschaulichung den kompletten (möglichen) mA-Wert dieses Beispiels hervorgehoben

(blaue Pfeile/ grüne Fläche). Jetzt ist auch ersichtlich, inwieweit der Strom in dieser Konstellation schwanken kann. D. h.: bei U_{REST} von 5 – 6 Volt liegt der Strom mit $R_V = 82 \Omega$ zwischen 61 und 73 mA.

Übrigens: Sofern U_{LED} aus welchen Gründen auch immer nicht genau bekannt ist, so ist diese Tabelle ebenfalls interessant. Denn die angegebenen mA-Werte in jeder Spalte sind ja als Maximalwert zu verstehen. Und da U_{LED} der meisten LEDs um 2 Volt beträgt (blau/ weiß zumeist 3 – 4 V), so liegt man mit dieser Tabelle immer im „grünen Bereich“.

Und wem diese Tabelle vom Konzept her besser gefällt, dann läßt sich auch diese beliebig erweitern, um z. B. die Reihe E24 mit allen Zwischenwerten und in kürzeren Abständen von U_{REST} darzustellen.

Damit ist dann wieder die klassische Formel zur Berechnung gefordert:
 $U_{REST} (max. *) / R (\Omega) \times 1000 = I (mA)$
 *) für Spalte U_{REST} „4 – 5“ gilt: U = 5 usw.

Die Tabellen – immer den richtigen R_V zur Hand

Aufgeführt sind, wie bereits erwähnt, alle Widerstände der Reihe E24 ($\pm 5\%$) inklusive „Zwischenwerte“ von $6,8 \Omega$ bis $30 \text{ k}\Omega$ in Relation zur jeweiligen Restspannung bei einem Strom von $0,5 \text{ mA}$ bis 75 mA . In der Tabelle „Große Toleranz“ fehlen alle Zwischenwerte, und die Restspannung ist in Abschnitten zu je 1 Volt aufgeführt.

Übrigens lassen sich relativ leicht weitere mA-Werte aus den Tabellen ableiten. Für z. B. 40 mA muß der entsprechende Wert für R_V bei 20 mA abgelesen und halbiert werden (R_V ggf. auf nächst höheren Wert aufrunden).

Werte von unter $0,5 \text{ Volt}$ für U_{REST} machen allerdings kaum Sinn, da hier immer auch die Möglichkeit besteht, die LED erhalte nicht die geforderte Mindestspannung (s. a. U/I-Kennlinie S. 9). Ebenso ausgespart habe ich sämtliche Werte über 15 Volt für U_{REST} . Denn ab hier kommt man langsam in einen Spannungsbereich von U_{GES} , der

u. U. gesundheitliche Gefahren birgt. (Mit $15 \text{ k}\Omega$ für maximal 20 mA könnte ich im Prinzip sogar jede x-beliebige LED auch an 220 Volt betreiben; aber wofür brauchen *wir* das schon?)

Somit decken die Tabellen ein äußerst breites Spektrum prinzipiell über den gesamten denkbaren Modellbaubereich ab – von der popeligen Batterie ab 3 Volt bis hin zu Leistungsnetzteilen von z. B. 18 Volt . Selbst für Eisenbahnanlagen und den Großteil des Kfz-Bereichs sind die Tabellen zu gebrauchen.

Wie die Tabellen im einzelnen anzuwenden und zu lesen sind, ist ausführlich auf den Seiten 2 und 3 bzw. auf Seite 12 beschrieben und illustriert. Und wem die Tabellen nicht genügen, die Erweiterung ist jeweils mit enthalten. Das gilt vor allem für den Fall, sofern die Tabellen in anderer Form (z. B. als Nachschlagewerk) neu arrangiert werden sollen.

Anhang

<u>Materialverzeichnis:</u>	FT-Leuchtstein grau	38217 – K
	FT-Leuchtstein schwarz	38216 – K
	FT-Lampenfassung	derzeit ohne
	<i>Bauteileauswahl</i>	
	Jumbo-LED rot/ $360^\circ 8 \text{ mm}$	184433 – C
	IR-LED 5 mm (Wellenlänge: 850 nm)	
	<i>Originaltyp:</i> SFH485	153818 – C
	IR-Transistor 5 mm (850 nm – m. Filter)	
	<i>Originaltyp:</i> SFH313FA	153924 – C
	LED rot/ superhell 5 mm	177029 – C
	LED blau/ superhell 5 mm	181210 – C
	Zweifarb-LED 5 mm (rot/ grün 2 Anschlüsse)	180245 – C
	Schalt draht $0,4 \text{ mm}^2$ / Cu verzinkt	605450 – C

K = Bestell-Nr. Knobloch / C = Bestell-Nr. Conrad Elektronik

<u>Literaturhinweis:</u>	Alfred Härtl – „Optoelektronik in der Praxis“ ISBN 3-9800 725-0-9	900036 – C
--------------------------	--	------------

<u>Tabellen:</u>	ab nächste Seite
------------------	------------------

Tabelle - Vorwiderstand

mA	0,5	1	2	5
Ω	"Restspannung" - Volt			
270			0,5	1,4
300			0,6	1,5
330			0,7	1,7
360			0,7	1,8
390			0,8	2,0
430			0,9	2,2
470			0,9	2,4
510	0,5	1,0	2,6	
560	0,6	1,1	2,8	
620	0,6	1,2	3,1	
680	0,7	1,4	3,4	
750	0,8	1,5	3,8	
820	0,8	1,6	4,1	
910	0,9	1,8	4,6	
κΩ				
1,0	0,5	1,0	2,0	5,0
1,1	0,6	1,1	2,2	5,5
1,2	0,6	1,2	2,4	6,0
1,3	0,7	1,3	2,6	6,5
1,5	0,8	1,5	3,0	7,5
1,6	0,8	1,6	3,2	8,0
1,8	0,9	1,8	3,6	9,0
2,0	1,0	2,0	4,0	10,0
2,2	1,1	2,2	4,4	11,0
2,4	1,2	2,4	4,8	12,0
2,7	1,4	2,7	5,4	13,5
3,0	1,5	3,0	6,0	15,0
3,3	1,7	3,3	6,6	
3,6	1,8	3,6	7,2	
3,9	2,0	3,9	7,8	
4,3	2,2	4,3	8,6	
4,7	2,4	4,7	9,4	
5,1	2,6	5,1	10,2	
5,6	2,8	5,6	11,2	
6,2	3,1	6,2	12,4	
6,8	3,4	6,8	13,6	
7,5	3,8	7,5	15,0	
8,2	4,1	8,2		
9,1	4,6	9,1		
10	5,0	10,0		
11	5,5	11,0		
12	6,0	12,0		
13	6,5	13,0		
15	7,5	15,0		
16	8,0			
18	9,0			
20	10,0			
22	11,0			
24	12,0			
27	13,5			
30	15,0			
33				
36				
39				

mA	5	10	15	20	30	50	75
Ω	"Restspannung" - Volt						
10						0,5	0,8
11						0,6	0,8
12						0,6	0,9
13						0,7	1,0
15						0,8	1,1
16						0,8	1,2
18					0,5	0,9	1,4
20					0,6	1,0	1,5
22					0,7	1,1	1,7
24					0,7	1,2	1,8
27				0,5	0,8	1,4	2,0
30				0,6	0,9	1,5	2,3
33				0,7	1,0	1,7	2,5
36		0,5	0,7	1,1	1,8	2,7	
39		0,6	0,8	1,2	2,0	2,9	
43		0,6	0,9	1,3	2,2	3,2	1
47		0,7	0,9	1,4	2,4	3,5	1
51	0,5	0,8	1,0	1,5	2,6	3,8	1
56	0,6	0,8	1,1	1,7	2,8	4,2	1
62	0,6	0,9	1,2	1,9	3,1	4,7	1
68	0,7	1,0	1,4	2,0	3,4	5,1	1
75	0,8	1,1	1,5	2,3	3,8	5,6	1
82	0,8	1,2	1,6	2,5	4,1	6,2	2
91	0,9	1,4	1,8	2,7	4,6	6,8	2
100	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	1
110	0,6	1,1	1,7	2,2	3,3	5,5	1
120	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	6,0	1
130	0,7	1,3	2,0	2,6	3,9	6,5	1
150	0,8	1,5	2,3	3,0	4,5	7,5	1
160	0,8	1,6	2,4	3,2	4,8	8,0	1
180	0,9	1,8	2,7	3,6	5,4	9,0	1
200	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0	2
220	1,1	2,2	3,3	4,4	6,6	11,0	2
240	1,2	2,4	3,6	4,8	7,2	12,0	2
270	1,4	2,7	4,1	5,4	8,1	13,5	2
300	1,5	3,0	4,5	6,0	9,0	15,0	2
330	1,7	3,3	5,0	6,6	9,9		
360	1,8	3,6	5,4	7,2	10,8		
390	2,0	3,9	5,9	7,8	11,7		
430	2,2	4,3	6,5	8,6	12,9		
470	2,4	4,7	7,1	9,4	14,1		
510	2,6	5,1	7,7	10,2	15,3		
560	2,8	5,6	8,4	11,2			
620	3,1	6,2	9,3	12,4	1		
680	3,4	6,8	10,2	13,6	1		
750	3,8	7,5	11,3	15,0	1		
820	4,1	8,2	12,3				
910	4,6	9,1	13,7				
κΩ							
1,0	5,0	10,0	15,0				
1,1	5,5	11,0					
1,2	6,0	12,0					
1,3	6,5	13,0					
1,5	7,5	15,0					

1)Rv mind. 0,5 W
 2)Rv mind. 1 W
 3)Rv mind. 2 W

Tabelle - Vorwiderstand (große Toleranz)

Ω	"Restspannung" - Volt											
	< 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12
	mA (Maximalwert)											
10												
12	83,3											
15	66,7											
18	55,6											
22	45,5	90,9										
27	37,0	74,1										
33	30,3	60,6	90,9 1									
39	25,6	51,3	76,9 1									
47	21,3	42,6	63,8	85,1 1								
56	17,9	35,7	53,6	71,4 1	89,3 2							
68	14,7	29,4	44,1	58,8 1	73,5 1	88,2 2						
82	12,2	24,4	36,6	48,8	60,9 1	73,2 2	85,4 2	97,6 2				
100	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0 1	60,0 1	70,0 2	80,0 2	90,0 2			
120	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0 1	58,3 1	66,7 2	75,0 2	83,3 2	91,7 3	
150	6,7	13,3	20,0	26,7	33,3	40,0 1	46,7 1	53,3 1	60,0 2	66,7 2	73,3 2	80,0 2
180	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9 1	44,4 1	50,0 1	55,5 2	61,1 2	66,7 2
220	4,5	9,1	13,6	18,2	22,7	27,3	31,8	36,3 1	40,9 1	45,4 2	50,0 2	54,5 2
270	3,7	7,4	11,1	14,8	18,5	22,2	25,9	29,6 1	33,3 1	37,0 1	40,7 1	44,4 2
330	3,0	6,1	9,1	12,1	15,2	18,2	21,2	24,2	27,3 1	30,3 1	33,3 1	36,3 1
390	2,6	5,1	7,7	10,3	12,8	15,4	17,9	20,5	23,1	25,6 1	28,2 1	30,8 1
470	2,1	4,3	6,4	8,5	10,6	12,8	14,9	17,0	19,1	21,3	23,4 1	25,5 1
560	1,8	3,6	5,4	7,1	8,9	10,7	12,5	14,3	16,1	17,9	19,6	21,4 1
680	1,5	2,9	4,4	5,9	7,4	8,8	10,3	11,8	13,2	14,7	16,2	17,6
820	1,2	2,4	3,7	4,9	6,1	7,3	8,5	9,8	11,0	12,2	13,4	14,6
κΩ												
1,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
1,2	0,8	1,7	2,5	3,3	4,2	5,0	5,8	6,7	7,5	8,3	9,2	10,0
1,5	0,7	1,3	2,0	2,7	3,3	4,0	4,7	5,3	6,0	6,7	7,3	8,0
1,8	0,6	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3	3,9	4,4	5,0	5,6	6,1	6,7
2,2	0,5	0,9	1,4	1,8	2,3	2,7	3,2	3,6	4,1	4,5	5,0	5,5
2,7		0,7	1,1	1,5	1,9	2,2	2,6	3,0	3,3	3,7	4,1	4,4
3,3		0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6
3,9		0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,1
4,7			0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,6
5,6			0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1
6,8				0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8
8,2				0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5
10					0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
12						0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0
15							0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8
18								0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
22									0,5	0,5	0,5	0,5
27												

1)Rv mind. 0,5 W
 2)Rv mind. 1 W
 3)Rv mind. 2 W