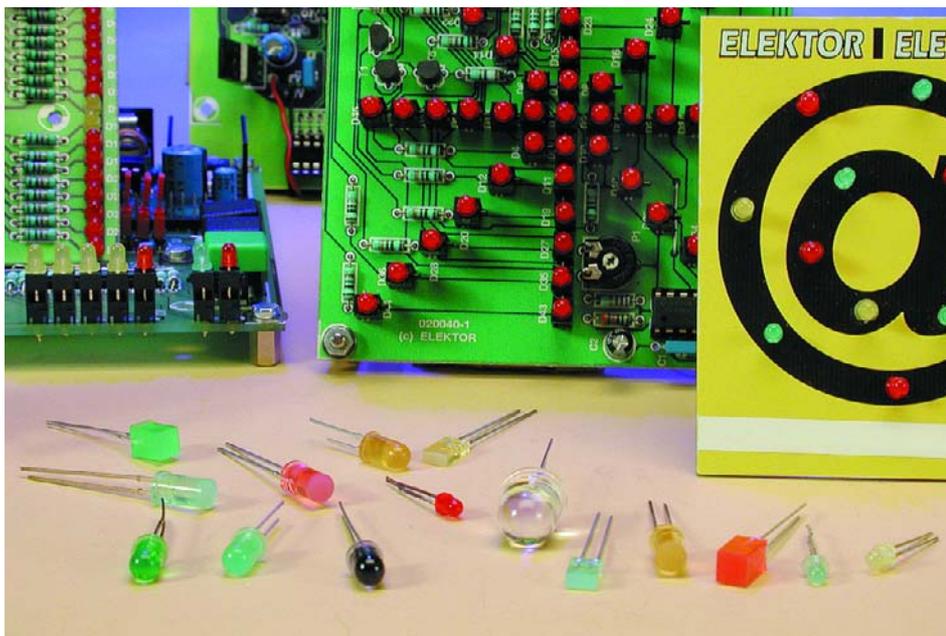


LED-Pulk

Zusammenschaltung von LEDs zu Beleuchtungszwecken

Von Klaus-Jürgen Thiesler

Eine Handvoll Leuchtdioden mit starker Leuchtkraft setzt als Raumbelichtung neue Akzente. Bei Verkehrssignaloptiken sparen sie Energie und reduzieren mit ihrer hohen Lebenserwartung drastisch die laufenden Wartungskosten.



LEDs sind mittlerweile so lichtstark geworden, dass sie zu Beleuchtungszwecken verwendet werden können, auch wenn die Preise noch recht hoch liegen. LEDs besitzen jedoch gravierende Vorteile gegenüber anderen Lichtquellen. Die Lebensdauer von bis zu 100.000 Stunden ist enorm. Die Optiken sind bereits im Gehäuse integriert, um das ausgestrahlte Licht nach den gewünschten Erfordernissen zu bündeln. Ein weiterer Vorteil ist die schnelle Schaltzeit einer LED. Als Bremsleuchte in Fahrzeugen beispielsweise reagieren sie deutlich schneller als die normalen

Glühlampen. Während LEDs in höchstens 100 ns reagieren, müssen Glühlampen als Kaltleiter mit 100...300 ms vorgewärmt werden. In dieser Zeit benötigen sie zu allem Überfluss noch Stromspitzen bis zum 50-fachen ihres Nennwertes. Natürlich gibt es auch Nachteile: Glühlampen sind wahre Infrarotstrahler, so dass sie auch bei hohen Umgebungstemperaturen noch funktionieren. LEDs dagegen sind passive Halbleiter mit entsprechendem

Temperaturspektrum. Ihre hohe Leistungsdichte lässt die maximale Chiptemperatur von 125 °C schon bei Umgebungstemperaturen über 85 °C erreichen. Als dritte Bremsleuchte im Heck eines Pkw wird dieser maximale Wert im Sommer lässtig erreicht. Wird die Chiptemperatur von 125 °C überschritten, fällt die LED aus, sobald sie aufleuchtet. Dies geschieht meistens mit dem maximal zulässigen Vorwärtsstrom, der die Chiptemperatur noch höher treibt. Da die Belastbarkeit eines Halbleiters reziprok der Umgebungstemperatur ist, tritt bei einfachen unkompenzierten Schaltungsdesigns schnell der Worst-case-Fall ein. Die überlastete LED leuchtet nicht mehr und öffnet den Schaltkreis. Bei der Herstellung von Leuchtdioden sind die Streuungen ihrer elektrischen Kennwerte so groß, dass sie zu Gruppen mit geringeren Toleranzen chargiert werden. Für die normale Verwendung einer einzigen LED-Kontrollleuchte sind diese Abweichungen unerheblich, sie fallen erst auf, wenn LEDs zu Arrays gruppiert werden und eng beieinander in ihrer Leuchtkraft konkurrieren. In Arrays werden die einzelnen Leuchtdioden auch elektrisch zu Gruppen verschaltet, so dass sie zudem elektrisch miteinander konkurrieren. Toleranzen in der Vor-

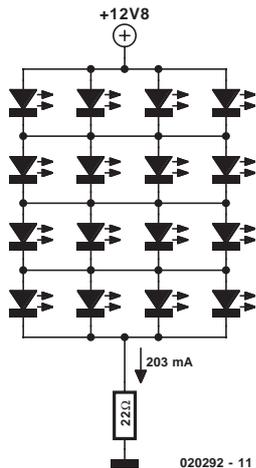


Bild 1. LED-Matrix mit einem einzigen Vorwiderstand.

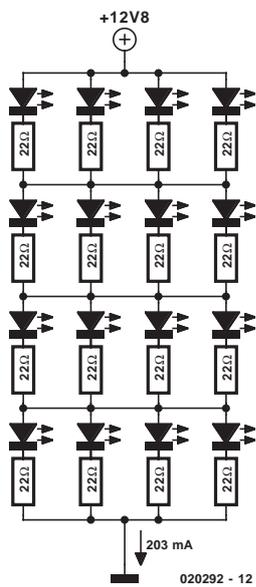


Bild 2. Jeder LED ihren Vorwiderstand

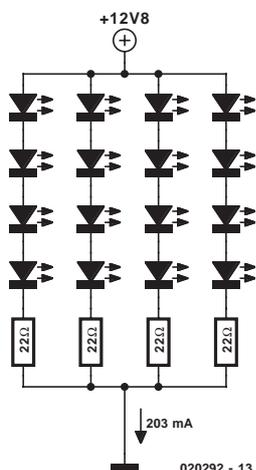


Bild 3. Vier unabhängige Stränge, die jeweils einen Vorwiderstand besitzen.

wärtsspannung von 150 mV sind in einer Marge durchaus üblich. Feinere Unterteilungen machen aus logistischen und wirtschaftlichen Gründen keinen Sinn. Sind optische Toleranzen ausschlaggebend - etwa für Leuchtbilder in Matrixstruktur oder mehrstellige LED-Anzeigen -, so müssen die LEDs nach ihrer Leuchtkraft mit bloßem Auge oder mit optischen Hilfsmitteln selektiert werden. Für reine Beleuchtungszwecke ist dieser hohe Aufwand nicht erforderlich.

Strom-Toleranzen

Um eine Handvoll LEDs zu einem Leuchtfeld zusammen zu schalten, gibt es drei Arten des Schaltungsdesigns.

In **Bild 1** ist das LED-Array insgesamt mit einem einzigen Vorwiderstand angeschlossen. Diese Art ist durchaus praktikabel und sie funktioniert auch mit LEDs aus einer Marge, also mit einer Vorwärtstoleranz von maximal $\pm 0,150$ V zwischen den einzelnen LEDs in der Matrix, da bei steigendem Vorwärtssstrom auch die Vorwärtsspannung ganz leicht ansteigt. In dieser Matrix leuchten einige LEDs mit oberem Spannungswert schwächer als solche mit unterem Spannungswert. Wird das Schaltungsdesign für einen nominellen Vorwärtssstrom von 50 mA pro LED ausgelegt, so liegen die Vorwärtsströme der einzelnen LEDs in diesem Versuchsaufbau zwischen 40 mA für die LED mit dem größten Spannungswert und 62 mA für die LED mit der niedrigsten Vorwärtsspannung.

Vor- und Nachteile der Schaltung nach Bild 1:

- Beim Ausfall einer LED leuchten alle anderen weiter, wenn auch teilweise mit erhöhter Ausfallerwartung.
- Das Design ist einfach, es wird nur ein Reihenwiderstand benötigt. Die LEDs sind parallel und seriell geschaltet, das lässt ein einfaches Layout und Bestücken zu.
- Eine Ausfallerkennung funktioniert nur im Fall des GAUs (größter anzunehmender Unfall), wenn nämlich die gesamte LED-Schal-

tung ausfällt. Im Automobilbereich schreibt der Gesetzgeber eine Ausfallerkennung von Blinkern vor, die sich hier nicht realisieren lässt, da der Vorwiderstand nicht als Sensor herangezogen werden kann, wenn eine oder mehrere LEDs ausfallen.

In **Bild 2** sind die LEDs zu einer anderen Matrix zusammengefasst, bei der jede einzelne LED einen Vorwiderstand erhält. Der Bestückungsaufwand nimmt rigoros zu. Da jede Leuchtdiode ihren eigenen Vorwiderstand hat, reagiert sie unabhängiger auf die Toleranzen ihrer Kollegen. Die Messergebnisse belegen wesentlich bessere Stromwerte. Sie weichen vom 50 mA-Idealwert nach unten bis auf 46 mA und nach oben bis auf 53 mA ab. Mit den Vorwiderständen lässt sich der Strom pro LED hinreichend genau einstellen. Für eine Raumbeleuchtung ist diese Schaltung die günstigste, weil der Ausfall von LEDs beobachtet und subjektiv beurteilt werden kann, wann sich ein Austausch lohnt.

Vor- und Nachteile der Schaltung nach Bild 2:

- Beim Ausfall einer LED leuchten alle anderen mit geringerer Ausfallerwartung weiter. Die Leuchtstärke nimmt nur unmerklich ab.
- Eine Ausfallerkennung funktioniert über die Strom/Spannungsdetektierung des Leistungsschalters, da hier die Ausfallerkennung für jede einzelne LED viel zu aufwendig wäre.

In **Bild 3** ist eine Reihenschaltung mit einem Vorwiderstand pro LED-Reihe zu sehen. Hier entfallen die Knotenpunkte, die jeder LED-Zeile eine definierte Spannung aufzwingen. Die vier LED-Spalten arbeiten unabhängig voneinander. Da die Differenzen der Vorwärtsspannungen bei gleichem Vorwärtssstrom verhältnismäßig kleiner ausfallen als die Differenzen der Vorwärtsströme bei gleicher Vorwärtsspannung, sind die Messergebnisse ähnlich denen der Matrixschaltung mit einzelnen Vorwiderständen zu jeder LED. Der Schaltungsaufbau ist im Gegensatz zu Bild 2 wesentlich einfacher und günstiger. Die Reihenschaltung zu mehreren Strängen besitzt dagegen jedoch einen Nachteil, der weiter unten beschrieben wird. Der Minimalstrom beträgt hier in einem Versuchsaufbau 47 mA, der Maximalstrom 53 mA.

Die Strangschaltung besitzt keinen Umleitungseffekt, weil die Knotenpunkte der parallelgeschalteten LEDs fehlen. Fällt eine LED aus, so auch der gesamte Strang, was bei einer Raumbeleuchtung natürlich ein Nachteil ist, weil die Leuchtstärke drastisch sinkt und es wenig Sinn macht, das gesamte Array

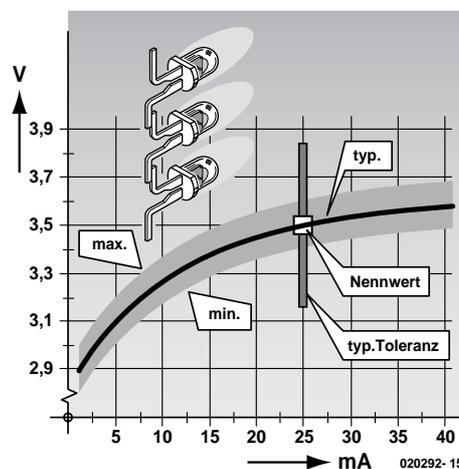
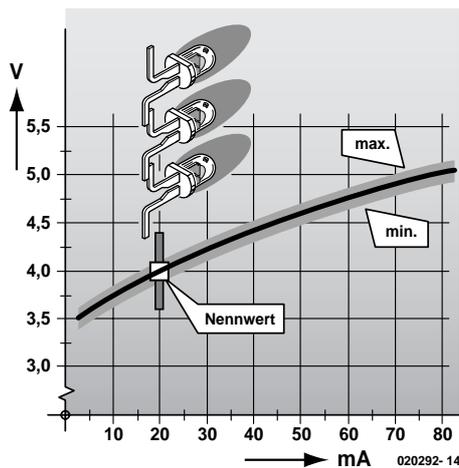


Bild 4. Kennwerte weißer und blauer LEDs.

auszutauschen, nur weil eine einzige von hunderten LEDs ausgefallen ist. Im Automobilbereich sieht die Eignung anders aus. Hier ist der Ausfall einer LED-Spalte nicht so gravierend, weil die Funktion als Warnanlage immer noch hinreichend gegeben ist, wenn auch mit verminderter Leuchtkraft. Die Lebensdauer der noch leuchtenden LEDs in den anderen Spalten wird durch den Ausfall des einen Stranges nicht beeinflusst. Dafür lässt sich eine einfache Ausfallerkennung realisieren, indem man die Vorwiderstände als Stromfühler heran zieht oder den gesamten Durchlassstrom wie bei Bild 2 detektiert.

– Beim Ausfall einer LED fällt der gesamte Strang aus, die anderen Stränge leuchten unabhängig davon weiter. Die Ausfallerkennung der noch leuchtenden LEDs wird nicht weiter beeinflusst.

– Als Blinker, Brems- oder Rücklicht ist die Realisierung der Ausfallerkennung mit normalem Aufwand durchzuführen, da die wenigen Vorwiderstände als Sensoren ein-

Tabelle 1				
Blaue LED TLHB4401		Maximalwerte		
Sperrspannung		UR	5	V
Biasstrom DC	bei $U_F = 4,0 \text{ V}$	IF	20	mA
Biasstrom ED 10%, $t_p < 10 \mu\text{s}$	bei $U_F = 5,2 \text{ V}$, $T_A < 60 \text{ }^\circ\text{C}$	IFSM	100	mA
Verlustleistung		PV	100	mW
Betriebstemperatur		TA	-40...+100	°C
Thermischer Widerstand		RthJA	400	K/W
Blaue LED TLHB4401		Kennwerte		
Leuchtstärke		IV	32	mcd
Leuchtkegel	bei $I_V = 100 \%$	φ	± 10	Grad
	bei $I_V = 50 \%$	φ	± 30	Grad
Wellenlänge	bei maximalem IV	λ	430	nm

gesetzt werden können.

Fazit: Bei allen Designs ist also ein wichtiges zu wissen, was beim Ausfall einer LED passiert. Bei einer Überstromung mit einer Überschreitung des zulässigen Grenzwertes der Chiptemperatur zerstört sich eine LED und unterbricht den Stromkreis. Bei den beiden Matrixschaltungen nach Bild 1 und Bild 2 ist dies tragisch, da die benachbarten LEDs kaum bessere Arbeitsbedingungen bekommen. In der Zeile der ausgefallenen LED müssen die anderen parallelen LEDs zusätzlich den Strom der ausgefallenen LED aufnehmen. Je weniger Stränge/Spalten die LED-Matrix besitzt, desto gravierender wird sich die höhere Bestromung auswirken. Das ist erst akzeptabel, wenn die LEDs weit unterhalb des maximalen Stromes betrieben werden und die Ausfallwahrscheinlichkeit somit drastisch sinkt. Oder die Anzahl der LED-Spalten ist so groß, dass der umzuleitende Ausfallstrom die einzelnen LEDs kaum mehr belastet werden als durch die $\pm 150\text{-mV}$ -Toleranzen.

Steigern der Leuchtstärke

Aus **Tabelle 1** mit den Kennwerten einer blauen LED lässt sich indirekt entnehmen, dass bei einem Dauerstrom von 20 mA die LED mit 100 % Leuchtkraft erstrahlt, die Leuchtkraft sich steigern lässt, wenn der Strom in einer bestimmten Weise erhöht wird. In IR-Fernbedienungen beispielsweise wird davon

Gebrauch gemacht, um die Reichweite zu erhöhen. Steigert man jedoch einfach den Bias-Gleichstrombetrieb, wird die LED sehr schnell zerstört. Für eine stärkere Leuchtkraft wird die LED im Pulsmodus betrieben. Das menschliche Auge ist für Blitze noch weit empfindlicher als ein IR-Empfänger. Schalten wir die LED mit maximalen Pulsen von 10 μs bei einer Frequenz von 1 kHz ein und einem Vorwärtsstrom von 100 mA, und berechnen die Betriebstemperatur (die maximal +60 °C betragen soll), so lässt sich leicht die subjektive Leuchtkraft um das 10-fache steigern. Eine Metallfassung leitet die Wärme der eingebauten LED gut ab und bündelt zudem das seitliche Streulicht nach vorne. Liegt der Vorwärtsstrom den nominellen Wert von 20 mA, so darf die Einschaltzeit 100 % betragen (Gleichstrom), setzen wir den Diodenstrom auf einen viel höheren Wert, darf die Einschaltzeit nur sehr kurz sein. Dazwischen muss die LED relativ sehr lange abkühlen. Einige der oben genannten DC-Wandler-ICs verfügen über einen Shutdown-Eingang, an den ein PWM-Signal zur Helligkeitsregelung angelegt werden kann. Wichtig ist, dass die maximale mögliche Umgebungstemperatur berücksichtigt und die maximale Verlustleistung der LED nicht überschritten wird. Das Datenblatt gibt eine Betriebstemperatur von +100 °C an. Dieser Wert ist eine elektrisch physikalische Größe, wichtiger für einen SOA-Betrieb gilt der Betriebswert von +60 °C. Bei

+100 °C erstrahlt die LED bereits mit verringerter Leuchtkraft.

Toleranzen

Für weiße LEDs beträgt die typische Vorwärtsspannung 3,5 V ±10 %. Diese Spannung ist der Nennwert in den Datenblättern. In **Bild 4** ist der Variationsbereich dargestellt: Bei 20 mA Biasstrom (Vorwärtsstrom) kann die Durchlassspannung von 3,15...3,85 V reichen. Wird die weiße LED mit einer unkalibrierten geregelten Spannung im Spannungsfühler-Modus betrieben, variiert der Biasstrom über einen größeren Bereich. Diese Variation der Vorwärtsspannung verursacht eine recht große Variation der Leuchtkräfte der einzelnen LEDs.

Zum Betreiben einer und mehrerer weißer LEDs gibt es moderne Schaltregler-ICs wie LM2791/2, MAX1698, MAX1848, MAX1912, LT1618, LT1932, LTC3200, LTC3400, oder den LM2585T-ADJ, der schon in Elektor 7-8/2000 (Seite 57) als Boost-Regler für ein 10-faches LED-Array einge-

setzt wurde. Sehr interessant ist der LT1618 von Linear Technology, der gleichzeitig strom- und spannungsrückgekoppelt ist, einen Abschalt-eingang und einen PWM-Eingang zur Helligkeitsregelung besitzt. Zudem ist der LT1618 im platzsparenden MSOP-10-Gehäuse untergebracht und schaltet mit bis zu 1,5 MHz, was das Volumen der Bauteile (im Gegensatz zur Schaltung mit dem altherwürdigen LM2585T-ADJ) sehr reduziert.

Viele dieser Schaltregler lassen sich im Stromfühler-Modus betreiben, was sich auf die Gleichmäßigkeit der Leuchtkraft positiv auswirkt. Denn die Regelung des Biasstromes ist feinfühler als die der Biasspannung und berücksichtigt die spezifische Durchlassspannung jeder LED, egal ob nun 3,15 V oder 3,85 V. Die Kennwerte der Biasströme berücksichtigen nicht die maximale Belastbarkeit der Leuchtdioden. Mit Vorwärtsströmen über nominell 25 mA lassen sie sich nur gepulst betreiben, wobei die Maximalwerte bei einer Schaltfrequenz von 1 kHz ,

WARNHINWEIS

Die Leuchtdichte der stärksten LEDs ist um ein Vielfaches höher als das einer Halogenbirne. Niemals in das Licht blicken! Die Lichtenergiemenge ist viel höher als das der geschützten Laserabtastung von CD-Spielern!

einem Tastverhältnis von 1:10 Einschaltdauer und 25 °C Umgebungstemperatur bis zu 100 mA beziehungsweise 50 mA reichen.

Einige Distributoren leuchtstarker LEDs selektieren speziell für die Verkehrsleitsysteme die LEDs hinsichtlich ihrer Lichtintensität innerhalb einer Verpackungseinheit auf eine Toleranz von maximal ±1,6 mcd. Hier werden gezielt nicht die lichtstärksten Leuchtdioden eingesetzt, um Blendeffekte zu vermeiden. In Signalanlagen kommen Indium-Gallium-Nitrid-LEDs mit einer Leuchtkraft um die 180 mcd zum Einsatz. Für Raumbeleuchtungen und Taschenlampen sind dagegen superhelle LEDs wie die L5-W54S-BS mit einer Leuchtkraft von bis zu 9000 mcd (!) vorzuziehen.

(020292)rg