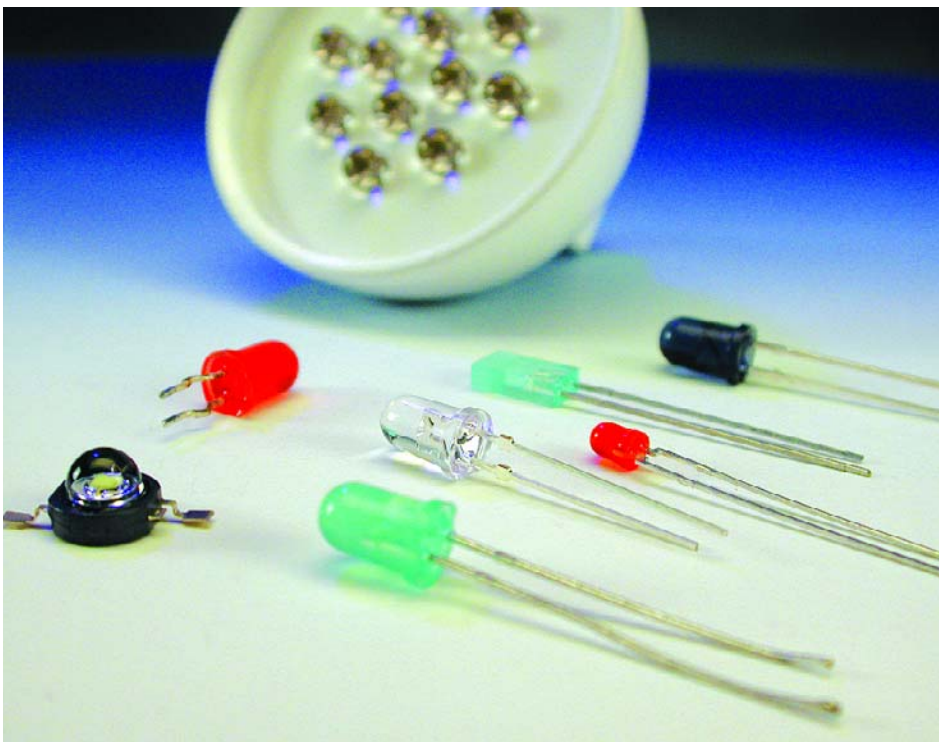


Mehr Licht !

High-Power-LEDs in der Praxis

Von Prof. Dr.-Ing. Martin Oßmann

In den letzten Jahren haben sich LEDs zu Lichtquellen weiterentwickelt, die klassischen Glühlampen in vielen Anwendungen den Rang ablaufen. Insbesondere die hohe Lebensdauer ist bei vielen Anwendungen von Vorteil.



Inzwischen sind die starken LEDs auch für private Anwender erhältlich. Die Muster, die in diesem Artikel beschrieben werden, stammen aus dem Lieferprogramm von Conrad Electronic. Nun ist es so, dass Elektrotechniker nicht unbedingt Licht-Fachleute sind. In diesem Artikel soll es daher zum einen darum gehen, einige beleuchtungstechnische Grundlagen zu vermitteln, zum anderen sollen zwei einfache Schaltungen vorgestellt werden, die den Betrieb von 1-W-High-Power LEDs ermöglichen.

Lumen oder Watt ?

Elektrotechniker verwenden zur Angabe elektrischer Leistungen üblicherweise das Watt. Auch Leistungen von Sendern oder Infrarot-Laserdioden für die optische Datenübertragung werden üblicherweise in Watt angegeben, die "Leistung" einer Lichtquelle für Beleuchtungszwecke stattdessen aber üblicherweise in Lumen. Dabei ist das

Lumen (lm) die photometrische Einheit zur Angabe des Lichtstroms einer Lichtquelle. Von photometrischen Einheiten spricht man, wenn die spektrale Empfindlichkeit des Auges mit berücksichtigt wird. Benutzt man eine Lichtquelle, die einfarbiges Licht mit einer Leistung von 1 W abstrahlt, ist der Helligkeitseindruck nämlich von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Handelt es sich nämlich zum Beispiel um UV oder IR, so sieht man herzlich wenig! Die Empfindlichkeitskurve des Auges (adaptiert auf Tageshelligkeit) zeigt **Bild 1**.

Am empfindlichsten ist das Auge für eine Wellenlänge von 555 nm (gelb). Eine Leistung von 1 W monochromatisch bei 555 nm entspricht einem Lichtstrom von 683 Lumen. Der Lichtstrom misst dabei alles Licht, das von einer Quelle ausgesandt wird, unabhängig davon, wohin es gestrahlt wird. Strahlt man etwa bei 650 nm 1 Watt ab, so ergibt das $683 \cdot 0,107 = 73$ Lumen, weil bei 650 nm (rotes Licht) die spektrale Empfindlichkeit bereits auf 0,107 gesunken ist.

Bei Lampen gibt man oft auch die Lichtausbeute an. Sie gibt an, wie viel Lumen man für die zugeführte elektrische Leistung erhält (Einheit lm/W). Bei Lampen, die mit elektronischen Vorschaltgeräten ausgestattet sind und als Gesamtsystem betrieben werden, ist es üblich, die

elektrisch vom System aufgenommene Leistung zu benutzen. Ein schlechter Wirkungsgrad im Vorschaltgerät reduziert also die Lichtausbeute des Systems. In **Tabelle 1** sind die Daten einiger gebräuchlicher Lichtquellen angegeben. Man sieht, über welche weite Bereiche sich die Zahlenwerte erstrecken. Den Rekord in Lumen/Watt hält die Natrium-Niederdrucklampe, die aber leider gelbes Licht abgibt, was zum Farb-Sehen herzlich ungeeignet ist. Weißes Licht lässt sich nur mit wesentlich geringerer Lichtausbeute erzeugen.

sich? In Candela wird die Lichtstärke, der (Teil-) Lichtstrom in einem (kleinen) Raumwinkel angegeben. Eine Lichtstärke von 1 cd liegt dann vor, wenn im (räumlichen) Vollwinkel ein Lichtstrom von 1 Lumen abgestrahlt wird. Es gilt also:

$$\text{Lichtstärke} = \frac{\text{Lichtstrom pro Raumwinkel}}$$

Angaben für die Lichtstärke findet man üblicherweise bei gebündelt strahlenden Lichtquellen wie Halogen-Reflektorlampen oder auch vielen LEDs. Mit der Lichtstärke wird dann oft ein Öffnungswinkel ange-

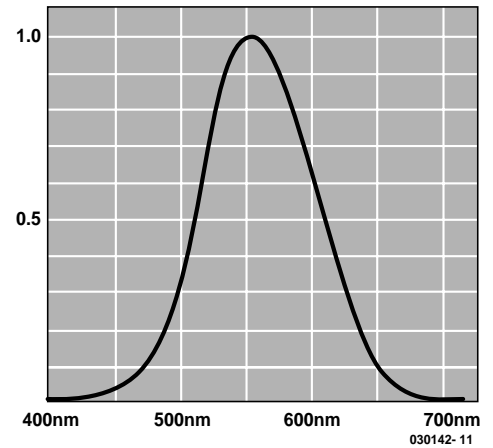


Bild 1. CIE-Empfindlichkeitskurve

Tabelle 1. Daten gebräuchlicher Lichtquellen.

Lichtquelle	Elektrische Leistung in Watt	Lichtstrom in Lumen	Lichtstärke in Candela	Lichtausbeute in lm/W
Glühlampe	75	900	–	12
Leuchtstofflampe	58	5400	–	90
Natrium-Niederdruck	130	26000	–	200
Hg-Hochdruck	1000	58000	–	58
Halogen-12 Volt	65	1700	–	26
Halogen Reflektor 10 Grad	50	–	12500	–
Halogen Reflektor 60 Grad	50	–	1100	–
LUXEON LED	1	18	–	18
NICHIA LED 20 Grad	0,08	–	6,4	–

Candela

Wer Daten von LEDs studiert, findet dort üblicherweise keine Angaben über den Lichtstrom, sondern über Candela (cd). Was hat es damit auf

geben, der angibt, wie groß der Winkel des Lichtkegels ist, an dessen Rand die Lichtstärke auf die Hälfte abgefallen ist. Eine extreme Lichtstärke erreichen Laser, weil der von

Ihnen ausgesandte Lichtstrahl einen sehr kleinen Öffnungswinkel hat. In **Tabelle 2** ist angegeben, wie man den Öffnungs- in den Raumwinkel umrechnet. Der Vergleich von Lichtquellen wird also

Tabelle 2. Umrechnung Öffnungs- in Raumwinkel.

Öffnungswinkel (Grad)	Raumwinkel (Steradian)
360,0	12,566 (4·π)
180,0	6,283 (2·π)
60,0	0,842
40,0	0,379
38,0	0,342
35,0	0,291
30,0	0,214
25,0	0,149
24,0	0,137
20,0	0,095
15,0	0,054
10,0	0,024



Bild 2. 1-W-LEDs von Luxeon in verschiedenen Bauformen.

Tabelle 3. Daten der Reflektorlampe Osram Dekostar 51.

Öffnungswinkel (Grad)	Lichtstärke (cd)	Lichtstrom (lm, berechnet)	Ausbeute (lm/W, berechnet)
10,0	9100,00	217,576	6,22
24,0	3100,00	425,638	12,16
38,0	1500,00	513,475	14,67
60,0	700,00	589,251	16,84

Tabelle 4. Daten der weißen Nichia-LEDs.

Öffnungswinkel (Grad)	Lichtstärke (cd)	Lichtstrom (lm, berechnet)	Ausbeute (lm/W, berechnet)
20,0	6,40	0,611	7,64
50,0	1,80	1,060	13,25
70,0	0,48	0,545	6,82

dadurch erschwert, dass Angaben von Lichtstrom und Lichtstärke gemacht werden und dabei gegebenenfalls noch die Farbe des Lichts zu berücksichtigen ist. Im Folgenden werden wir einige Beispiele durchgehen, damit Sie ein Gefühl für die Größen bekommen.

Beispiel 1: Fahrradlampe

Die Lampe selbst nimmt 3 W elektrische Leistung auf und liefert einen Lichtstrom von etwa 30 lm. Dies ergibt eine Lichtausbeute von ungefähr 10 lm/W. Als Rundumstrahler (Öffnungswinkel 360 Grad, Raumwinkel 4π) ergibt das eine Lichtstärke von ca. 2,4 Candela. Montiert man die Lampe zur Bündelung in einem Reflektor, erreicht man in der Strahlmitte circa 250 Candela!

Tabelle 5. Lichtstrom verschiedenfarbiger Luxeon-LEDs.

Farbe	typischer Lichtstrom (lm)
WHITE	18
GREEN	25
CYAN	30
BLUE	5
ROYAL BLUE	100 mW
RED	44
AMBER	36

Tabelle 6. Daten des 12-V-LED-Spots.

Öffnungswinkel (Grad)	Lichtstärke (cd)	Lichtstrom (lm, berechnet)	Ausbeute (lm/W, berechnet)
50,0	30	17,7	14,7

Beispiel 2: Niedervolt-Halogenlampe
Eine Osram-Halostar-Lampe (Rundumstrahler, kein Reflektor, Typ 64432 IRC) nimmt 35 W elektrischer Leistung auf und liefert einen Lichtstrom von 900 Lumen. Die Ausbeute liegt bei 26 lm/W, das ist in etwa der Wert, den gute Halogenlampen erreichen.

Beispiel 3: Niedervolt-Halogen-Reflektorlampen

Bei Reflektorlampen wird üblicherweise die Lichtstärke und der Öffnungswinkel angegeben. Dies macht Sinn, da es sich um Lampen für die gebündelte Beleuchtung handelt. Oft kann man Lampen der gleichen Leistungsfähigkeit (Watt) mit verschiedenen Öffnungswinkeln kaufen. Für die Reflektorlampe Osram Dekostar 51 (51 mm Reflektordurchmesser) ergeben sich bei 35 W, 12 V die in **Tabelle 3** angegebenen Werte.

Dabei wurde der Lichtstrom und die Ausbeute aus dem Öffnungswinkel berechnet. Geht man davon aus, dass in allen Lampen die gleichen Glühwendel gleichviel Licht erzeugen, so sieht man an der niedrigeren Ausbeute bei kleinen Öffnungswinkeln, dass es schwieriger ist, Licht gut zu bündeln. Die Lichtstärke

alleine ohne Angabe des Öffnungswinkels erlaubt keinen Vergleich von Lampen.

Beispiel 4: LEDs von Nichia

Von der Firma Nichia werden mit die besten weißen LEDs hergestellt, die es derzeit gibt. In **Tabelle 4** sind die Daten einiger Typen zusammengestellt (jeweils 20 mA Betriebsstrom bei etwa 4 V, 5 mm Durchmesser). Die Werte für Lichtstrom und Ausbeute sind wiederum berechnet. Die Candela-Werte sind im Vergleich zu denen der Halogen-Lampen so niedrig, weil die aufgenommene elektrische Leistung auch so klein ist! Immerhin nimmt eine LED gerade mal $20\text{ mA} \cdot 4\text{ V} = 80\text{ mW}$ auf. Die Ausbeute kommt mit 13 lm/W durchaus an den Wert von Halogenlampen heran.

Beispiel 5: Luxeon-LEDs

Seit kurzem gibt es von Lumileds unter der Marke Luxeon LEDs (**Bild 2**) mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1 W (330 mA bei etwa 3,4 V für eine weiße LED). Für die Strahlungscharakteristik *Lambertian* sind die Werte in **Tabelle 5** angegeben.

Der Wert einer weißen LED übertrifft inzwischen den einer Halogen-Reflektorlampe. Auch bei farbigen Strahlern werden beachtliche Werte erreicht. Die Farbe *Royal Blue* hat ihr Strahlungsmaximum bei ungefähr 450 nm. Bei dieser Wellenlänge ist das Auge schon so unempfindlich, dass die Strahlungsleistung in Milliwatt angegeben wird.

Dieser Wert liefert uns einen ersten Hinweis, wie effizient solch eine LED arbeitet. Von 1 W elektrischer Leistung werden immerhin 10 Prozent in Licht gewandelt und abgestrahlt.

Beispiel 6: 12-V-LED-Spot 50 mm

Bei Conrad Electronic gibt es LED-Spots, die man an klassischen 12-V-Halogentrafos betreiben kann. Ihre Leistungsaufnahme beträgt 1,2 W. Aus dem Datenblatt ist der Öffnungswinkel von 50 Grad und die Lichtstärke von 30 cd entnommen.

Die damit erreichte Ausbeute liegt bei einem heute für LEDs üblichen Wert (zum Beispiel 50 Grad Nichia LEDs). Im Spot selbst (**Bild 3**) sind zwölf LEDs untergebracht. Geht man von



Bild 3. 12-V-LED-Spot

einem Betriebsstrom von ungefähr 20 mA bei 4 V Betriebsspannung aus, kommt man auf eine Leistung von insgesamt 0,96 W. Die Differenz von 1,2 W $-$ 0,96 W = 0,24 W geht vermutlich im Gleichrichter und in der Stromregelung verloren.

Kühle Lichtquelle LED?

Oft liest man, dass LEDs keine Wärme abgeben und deswegen viel effizienter seien als zum Beispiel Halogenlampen. Was hat es mit dieser Behauptung auf sich? Sieht man die Angaben in Tabelle 1 zur Lichtausbeute von Halogenlampen und LEDs, so fällt auf, dass beide Lichtquellen nur einen sehr geringen Teil der elektrischen Leistung in sichtba-

res Licht umsetzen. Wo bleibt der Rest? Nun, eine Glühlampe besteht aus einer heißen Glühwendel, die einen beträchtlichen Teil der Leistung im Infraroten abstrahlt (der Faden wird durch die Strahlung quasi gekühlt). Ein weiterer Teil der Wärme wird vom Faden gegebenenfalls durch Konvektion innerhalb des Kolbens abgeführt.

Nun kann man Leuchtdioden nicht bei einigen tausend Kelvin betreiben, um sie ebenfalls per Strahlung zu kühlen. Wir müssen dafür sorgen, dass der Halbleiter nicht viel heißer als 120 °C wird. Bei 120 °C ist die Strahlungskühlung aber noch sehr ineffektiv und es wird nur wenig Energie als Infrarotstrahlung abgegeben. So ist zur Kühlung ein Kühl-

körper anzubringen, der über eine große Oberfläche verfügt. Damit kann er einen Teil der Energie durchaus als IR-Strahlung abgeben, aber den größten Teil führt er als Wärme durch Konvektion der Umgebungsluft zu. Spätestens, wenn man LED-Leuchten bauen will, die den Lichtstrom einer 35-W-Halogenlampe abgeben, merkt man, dass die Kühlung der LEDs zum entscheidenden Problem wird und nur durch entsprechende konstruktive Maßnahmen zu bewältigen ist.

Hierin liegt der Grund, warum zum Beispiel Luxeon eine Reihe von High-Power-LEDs gleich mit passenden Trägern zur Kühlkörper-Montage liefert. Bei der Dimensionierung der Kühlkörper geht man davon aus, dass die gesamte elektrische Leistung in Wärme umgesetzt wird. Die als Licht abgestrahlte Leistung kann man (immer noch) getrost vernachlässigen. Elektrisch gesprochen (Watt optisch pro Watt elektrisch) haben also auch die neuesten LEDs immer noch einen schlechten Wirkungsgrad.

Luxeon-LEDs

Die derzeit leistungsfähigsten LEDs im freien Handel sind die Luxeon-LEDs (Bild 4) von Lumileds, einem Joint Venture von Agilent und Philips. Die derzeit lieferbaren Typen nehmen eine Leistung von 1 W auf. Dabei hat zum Beispiel die weiße LED ein Spannung von 3,4 V, das heißt, sie darf maximal mit einem Strom von ungefähr 300 mA betrieben werden. Die steile Diodenkennlinie macht einen direkten Betrieb an Spannungsquellen ohne Strombegrenzung oder besser Stromregelung unmöglich.

Die LED verfügt auf der Rückseite über eine metallische Kontaktfläche zur Kühlung. Immerhin wird in dem kleinen Gehäuse 1 W fast vollständig in Wärme umgesetzt. Diese Wärme muss abgeführt werden. Hinweise dazu sind den Datenblättern zu entnehmen. Bei steigender Temperatur darf die LED auch nicht mehr mit dem maximalen Betriebsstrom betrieben werden (derating). Ein kleiner Kühlkörper ermöglicht allerdings den Dauerbetrieb mit vollem Strom.

Noch eine Bemerkung zur Lebensdauer. Die Lebensdauer wird mit "bis zu 100.000 Stunden" angegeben, immerhin mehr als 10 Jahre im Dauerbetrieb. Allerdings nimmt der Lichtstrom im Leben der LED kontinuierlich ab. Bei der weißen LED dauert es etwa 10.000 Stunden bis zu einem um 20 % reduzierten Lichtstrom. Nach weiteren 40.000 Stunden ist er um weitere 20 % gesunken ist. Dennoch handelt es sich bei diesen LEDs um Lichtquellen mit sehr hoher Lebensdauer. Vergleichsweise „hält“ ein Pkw 200.000 km (bevor der TÜV uns scheidet!). Bei einer mitt-

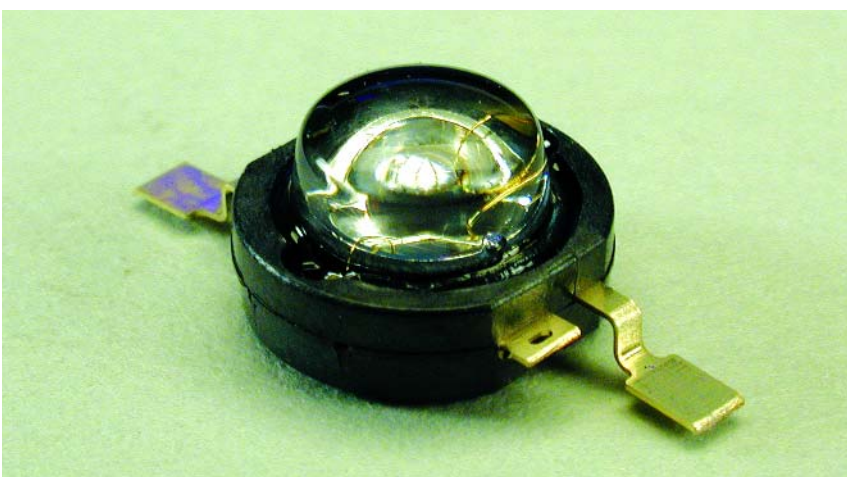


Bild 4. Einzelne Luxeon-LED.

leren Geschwindigkeit von 100 km/h kommt man auf eine Betriebszeit von lediglich 2.000 Stunden! Mit den LEDs kann man also sicherstellen, dass daraus gebaute Lichtquellen mit Sicherheit länger leben als das Auto. Sie müssen also nie ausgewechselt werden. Das macht LEDs zu einer interessanten Beleuchtungs-Variante an allen Stellen, wo das Wechseln einer Lampe schwer und teuer ist. Zu den Luxeon-LEDs gibt es im Internet umfassendes Informationsmaterial mit elektrischen und thermischen Betriebshinweisen, Strahlungsdiagrammen et cetera. Aus diesem Material wollen wir nun zwei Schaltungen vorstellen, mit denen Sie in dieses interessante Gebiet einsteigen können.

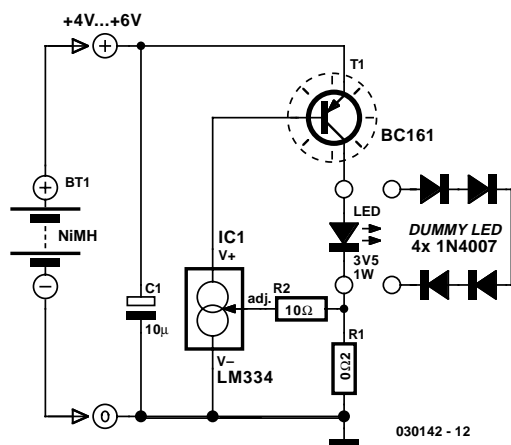
Luxeon-LED an 4,8-V-NiMH-Akkus

In **Bild 5** ist eine einfache Schaltung dargestellt, mit der man die neuen 1-W-LEDs an einer Spannung von 4...6 V betreiben kann. Dies ist ideal für den Betrieb an vier NiMH-Zellen. IC1 ist eine Stromquelle, deren Strom von der Spannung am Widerstand R1 (0,2 Ω) und R2 abhängt. Der Sollwert zwischen ADJ und V- liegt bei etwa 65 mV. Dadurch stellt sich ein LED-Strom von ungefähr 250 mA ein. Dabei ist zu beachten, dass die Referenzspannung von 65 mV proportional zur absoluten Temperatur ist. Steigt daher die Umgebungstemperatur von 25 °C auf 40 °C, so steigt der Strom auf circa

$$250 \text{ mA} \cdot \frac{273 + 40}{273 + 25} = 260 \text{ mA}$$

an. Für viele Anwendungen reicht das aus, man sollte aber darauf achten, dass IC1 nicht durch Abwärme von T1 oder LED D1 angeheizt wird! Der Vorteil dieser einfachen Schaltung ist, dass sie mit einer sehr geringen Spannung über dem Sense-Widerstand R1 auskommt. Es handelt sich also um einen einfachen Low-drop-Stromregler. Die Eingangsspannung sollte nicht über 6 V liegen, da sonst beim Kollektorstrom von 250 mA die Verlustleistung in T1 zu groß wird!

Da eine 1-W-LED mit einem Preis von etwa 10 € nicht gerade zu den billigsten Bauteilen zählt, ist bei der Inbetriebnahme der Schaltung besondere Vorsicht geboten. Um die LED nicht durch irgendeinen Fehler in die ewigen Jagdgründe zu schicken, sollte man wie in Bild 5 angedeutet die Schaltung zuerst mit einem LED-Dummy in Form von vier in Reihe geschalteten Dioden 1N4007 betreiben. Mit einem regelbaren Netzgerät erhöht man die Spannung langsam. Ab circa 3 V steigt der Strom bis auf den Endwert von 250 mA. Wenn dieser Endwert erreicht ist, sollte ein



030142 - 12

Bild 5. Linearregler für eine 1-W-LED.

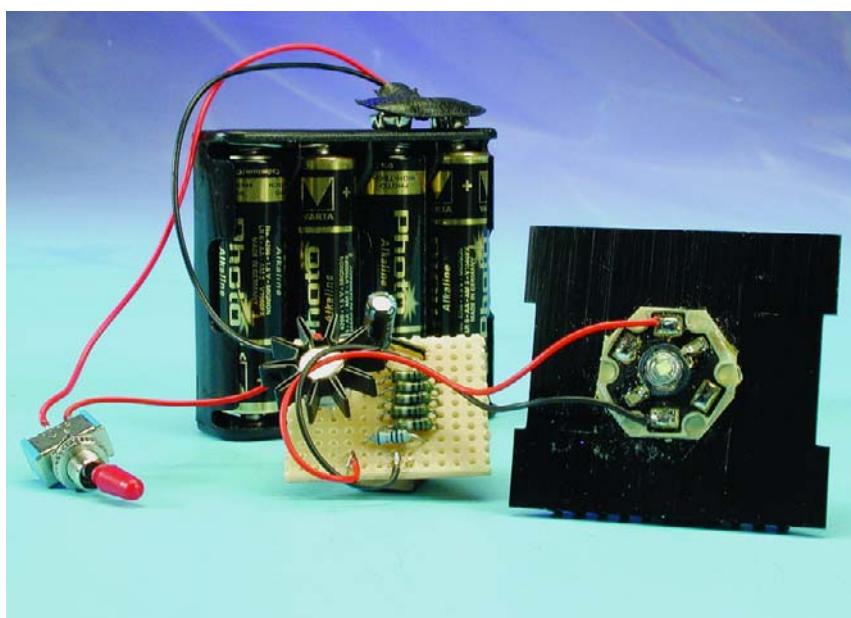
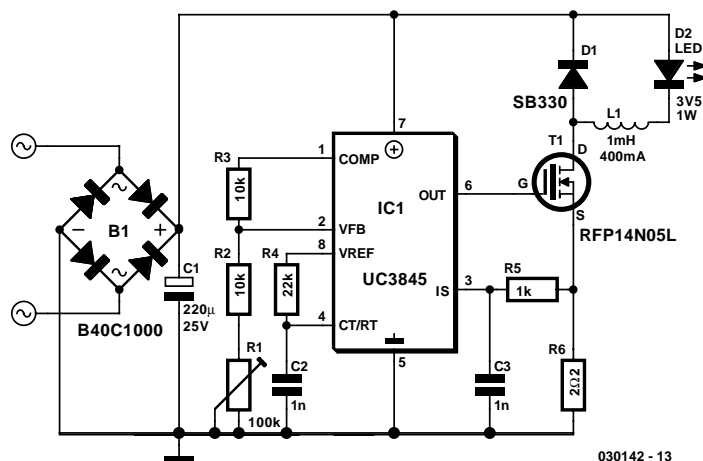


Bild 6. Der Low-drop-Stromregler auf einem Lochrasterplatinchen aufgebaut.



030142 - 13

Bild 7. Ein einfacher Schaltregler mit 70 % Wirkungsgrad.

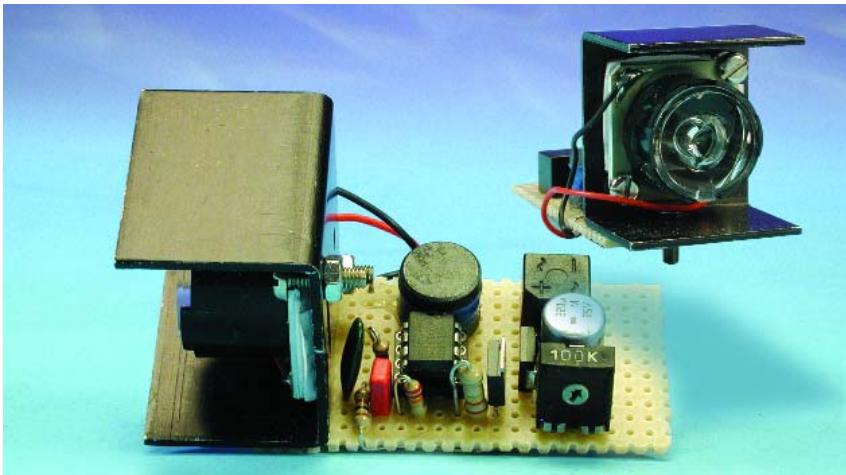


Bild 8. LED mit Optik, Kühlkörper und 12-V-Netzteil.

weiteres Erhöhen der Spannung bis auf 6 V zu keinem weiteren Stromanstieg führen. Ist dieser Funktionstest bestanden, steht der Inbetriebnahme mit der echten LED nichts mehr im Wege. **Bild 6** zeigt einen Testaufbau dieser Schaltung auf einer kleinen Lochrasterplatine zusammen mit einer 1-W-LED vom Typ Luxeon Star.

12-V-LED-Versorgung

Will man einzelne LEDs mit einer Betriebsspannung von 12 V betreiben, ist der Wirkungsgrad eines Linearreglers wie in Bild 6 zu gering, da die meiste Energie als Verlustwärme im Linearregler verloren geht. Als mögliche Alternative bietet sich ein einfacher Schaltregler wie in **Bild 7** an, die 1-W-LEDs am 12-V-Niederspannungsnetz für Halogenlampen (Wechselstrom) oder am

12-V-Auto-Akku treibt. Der Schaltregler verwendet ausschließlich Standardbauteile und erreicht einen Wirkungsgrad von 70 %. Das ist nicht gerade berauschend, aber die Schaltung stellt auch keine hohen Anforderungen an die Komponenten.

Es kommt ein Standard-Pulsweitenmodulations-IC UC3845 im Current-Modus zum Einsatz. Das RC-Glied $R4/C2$ bestimmt die Schaltfrequenz. Mit $R2/R1$ wird der Strom eingestellt. Da eine verhältnismäßig große Induktivität $L1$ verwendet wird, ist der Stromripple (Welligkeit) nicht allzu groß. Der LED-Strom wird nicht geregelt, sondern gesteuert, indem der Spitzenstrom durch $L1$ eingestellt wird. Dadurch entfällt eine aufwendige Strommessung im LED-Stromkreis. Bei der ersten Inbetriebnahme sollte man wieder den vorher beschriebenen Dummy zu verwenden.

den.

Überschreitet die Eingangsspannung (bei Tests als Gleichspannung) 10 V, schwingt die Schaltung an. Mit $R1$ wird der LED Strom auf ungefähr 250 mA eingestellt. Bei 12 V Eingangsgleichspannung ergibt sich eine Stromaufnahme von circa 120 mA. Der LED-Strom darf nicht von der Eingangsspannung abhängen (zumindest nicht stark). Ist dieser Test bestanden, kann man getrost eine 1-W-LED anschließen und auch die Eingangsseite mit $12 V_{\text{eff}}$ Wechselspannung speisen. Damit hat man dann die Möglichkeit, das klassische 12-V-Halogenensystem mit ein paar modernen Akzenten zu versehen.

Bei dieser Schaltung kam eine LED mit integrierter Optik (Luxeon STAR/O) zum Einsatz. Ein kleiner zusätzliche Kühlkörper ermöglicht den Dauerbetrieb. Die LED wird mit einer elastischen isolierenden Wärmeleitfolie auf dem Kühlkörper montiert (**Bild 8**).

Ausblick

Man kann gespannt sein, was die Zukunft bringt. Inzwischen gibt es bereits LEDs mit 700 mA Betriebsstrom. Es gibt Projekte, LCD Monitore mit LEDs zur Beleuchtung auszustatten. Es gibt Serien-Autos mit LED-Rückleuchten, es gibt LED-Ampeln, alles Anwendungen, die vor ein paar Jahren noch undenkbar waren.

(030142)rg

Web-Adressen:

www.luxeon.com

www.nichia.com

www.conrad.de

www.osram.de

www.vs-optoelectronic.com/ger/