

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 100 (2009)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Entstehung von Licht in Leuchtioden  
**Autor:** Haudum, Christian / Schramm, Carl  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856407>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Entstehung von Licht in Leuchtdioden

## Wie kommt Strom in die LED?

Leuchtdioden etablieren sich als Beleuchtungsquelle der Zukunft dank ihrer hohen Lichtausbeute, dem geringen Energieverbrauch, der langen Lebensdauer und der problemlosen Entsorgungsmöglichkeit. Welche Punkte gilt es bei der Wahl der Treiberelektronik zu beachten, damit diese ebenso effizient und langlebig funktioniert?

Bei LEDs entsteht das Licht am pn-Übergang, der Rekombinationszone. Durch Anlegen einer Spannung an der p- und n-Schicht wandern die überschüssigen Elektronen der n-Schicht in die p-Schicht und

eine um ca. 30% höhere Helligkeit bei einer um ca. 6% niedrigeren Zellenspannung. Beleuchten mehrere LEDs einen Diffusor, so entstehen unterschiedlich helle Bereiche auf der Fläche.

*Christian Haudum, Carl Schramm*

füllen dort die Löcher auf, d.h. sie rekombinieren. Bei der Rekombination entsteht jeweils ein Lichtquant, das ein Teil des ausgesendeten Lichtstroms ist. Das bedeutet, dass der Lichtstrom (Intensität) proportional zum elektrischen Strom ist. Die Farbe des Lichts hängt von den verwendeten Materialien und Dotierungsatom ab.

### Die parallele LED-Ansteuerung über eine Spannungsquelle

Auch wenn eine LED mit konstanter Spannung betrieben wird, stellt sich bei den verschiedenen Exemplaren erheblich unterschiedlicher Strom ein. Die Zellenspannung einer LED variiert stark nach Exemplar, was das Datenblatt zeigt. So z.B. wird für die LED Luxeon III Emitter bei 700 mA eine Vorrwärtsspannung  $V_F$  (Forward Voltage) von 3,03–4,47 V angegeben. Gleichzeitig weist die Strom-Spannungs-Kennlinie einer LED einen exponentiellen Verlauf auf (Bild 1). Dies hätte zur Folge, wenn z.B. mehrere LEDs im Parallelbetrieb einen Diffusor als Hintergrundbeleuchtung anstrahlen sollen, dass Inhomogenitäten in der Intensität über der beleuchteten Fläche auftreten.

So weist die Golden Dragon von Osram bei 350 mA eine Zellenspannung  $V_F$  von 2,7–3,8 V auf. Wie Bild 2 zeigt, entnimmt  $D_1$  einen Strom von 350 mA und  $D_2$  einen von 500 mA bei einem Parallelbetrieb an eine Konstantspannungsquelle mit einer geeigneten Ausgangsspannung von z.B. 3,4 V. Deshalb zeigt LED  $D_2$  gegenüber  $D_1$

Durch den Einsatz einer Konstantstromquelle werden sowohl diese Effekte wie auch weitere unangenehme Nebeneffekte kompensiert. Wird z.B. ein Strom von 350 mA eingeprägt, um beim vorigen Beispiel zu bleiben, dann stellt sich an der Konstantstromquelle eine Spannung von  $3,2 + 3,4 \text{ V} = 6,6 \text{ V}$  ein. Bei einem Zellstrom von 350 mA weist die LED  $D_1$  eine Zellenspannung von 3,4 V auf und die LED  $D_2$  eine Zellenspannung von 3,2 V. Jede LED wird jedoch vom gleichen Strom durchflossen und zeigt somit gleiche Helligkeit. Ein Abgleich der Helligkeit durch Selektion von LEDs oder durch Vorschalten von Vorwiderständen ist somit nicht mehr notwendig (Bild 3).

### Einflüsse auf Farbschwankungen

Die einzelnen LED-Exemplare weisen individuelle fertigungsbedingte Farbschwankungen auf, die durch Sortieren nach Farbklassen («Binning») umgangen werden können. Die Grenzen der «Bins» werden so festgelegt, dass Exemplare, die innerhalb dieser Grenzen liegen, visuell nicht voneinander unterscheiden werden können. Die Farbe des emittierten Lichts einer LED ist jedoch auch vom Zellstrom  $I_F$  abhängig, wie Bild 4 zeigt. In der Abbildung stellen x und y die Farbortkoordinaten nach CIE

articles spéciales

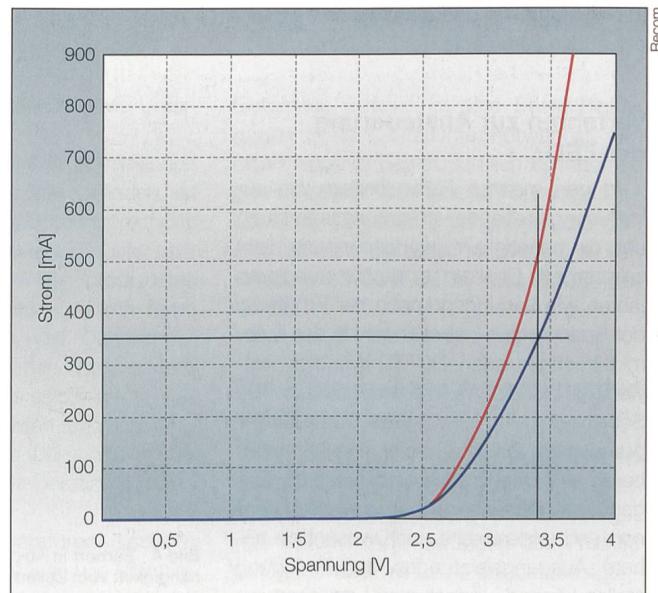


Bild 1 Typische Kennlinie einer weißen Power-LED.  
Blau: Strom.  
Rot: Spannung.

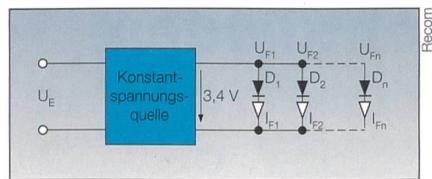


Bild 2 Spannungsansteuerung.

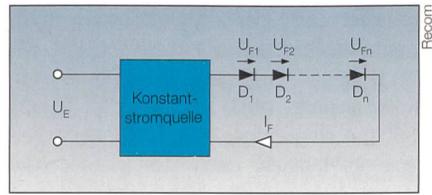


Bild 3 Stromansteuerung.

1931 dar. Die Kurve zeigt die Änderung des Farborts in Abhängigkeit vom LED-Strom. Dieser Nebeneffekt tritt aber bei Konstantstromspeisung erst gar nicht auf.

Die Zellenspannung  $V_F$  einer weißen LED weist einen Temperaturgang  $TK = -3,6$  bis  $-5,2 \text{ mV/K}$  auf. Die Kennlinie der weißen LED zeigt, wie alle anderen LEDs auch, im Durchlassbereich eine sehr grosse Steigung in der Kennlinie. Das bedeutet, dass kleine Änderungen in der Zellenspannung  $V_F$  eine sehr grosse Änderung im Zellenstrom  $I_F$  hervorrufen. Bei Erwärmung der LED um 50 K verringert sich die Zellenspannung um 180–260 mV, was als praxisnaher Fall betrachtet werden kann. Das hätte bei Konstantspannungsspeisung zur Folge, dass der Strom  $I_F$  sich um ca. 45% reduziert. Dadurch nimmt die Helligkeit der LED um ca. 50% ab, und die Farbe verschiebt sich in Richtung Rot. Bei Konstantstromspeisung hat die Änderung der Zellenspannung  $V_F$  der LED keine Auswirkung auf den Zellenstrom  $I_F$ , da dieser eingeprägt (d.h. geregelt) ist und damit keine Farverschiebung verursacht.

## Verfahren zur Ansteuerung der LED

In den meisten Fällen passen die zur Verfügung stehende Versorgungsspannung und die benötigte Vorwärtsspannung nicht zusammen. Deshalb sind Wandlungsverfahren wie Ladungspumpen zur Erhöhung der Spannungen insbesondere in der Automobiltechnik oder DC/DC-Wandler notwendig. DC/DC-Wandler beziehungsweise Schaltregler sind im Vergleich zu Ladungspumpen im Vorteil, da sie einerseits mit höheren Wirkungsgraden und weiteren Eingangsspannungsbereichen aufwarten können und andererseits auch wesentlich höhere Ausgangsleistungen zur Verfügung stellen können. Jedoch sind Ladungspum-

pen in Anwendungen mit kleineren Hintergrundbeleuchtungen zu finden, die aus Batterien oder Akkus mit kleineren Spannungen gespeist werden.

Zur Ansteuerung und Dimmung der LEDs sind sogenannte Treiberschaltungen notwendig. Dazu werden hauptsächlich 2 Technologien verwendet: der Linearregler und die Pulsweitenmodulation (PWM).

Der Artikel von Prof. Dr. Peter Walther auf Seite 37 geht näher auf diese Technologien und deren Rückwirkungen auf das Netz ein.

Dabei ist darauf zu achten, dass die Taktfrequenz der PWM-Signale mindestens 400 Hz beträgt, damit das menschliche Auge kein flackerndes Licht erkennt. Bei der Ansteuerung von RGB-Modulen errechnet der verwendete Mikrocontroller einerseits die gewünschte Lichtfarbe der 3 LED-Kanäle und andererseits die notwendigen Intensitäten der Farbquellen und generiert so die 3 dazu notwendigen Pulsbreitenverhältnisse für die jeweiligen PWM-Signale. Natürlich könnte man für jede einzelne LED-Farbe einen eigenen Treiber vorsehen, was vor allem die Treiberhersteller freuen würde, aber es ist auch anders möglich, wie Bild 5 zeigt.

Pulsweitenmodulation ist an sich recht linear, allerdings nur, solange die Flanken des PWM-Signals ausreichend steil sind. Besonders bei sehr grossem oder sehr kleinem Puls/Pausen-Verhältnis aber wird das schwierig zu erreichen, wodurch die Dimmlinearität leidet.

Der massgebliche technische Unterschied zwischen PWM- und Analogdimmen ist, dass beim PWM-Dimmen die Power-LED ein farbstabiles Licht produziert, da ja der Zellenstrom nicht verändert wird und die Lichtintensität durch das Verhältnis der Einschalt- und Ausschaltzeit erzeugt wird. Dies ist insbesondere bei der Regelung eines RGB-Farbtons interessant. Bei monochromen, weißen LEDs wie beispielsweise bei einer Straßenbeleuchtung genügt das Stromdimmen vollends.

## Der PWM-Regler

Die Helligkeit der LEDs kann auch durch das Ein-/Ausschalt-Verhältnis des LED-Stroms geregelt werden. Bei dieser Pulsweitenmodulation errechnet sich der mittlere Zellenstrom aus dem Ein-/Ausschalt-Verhältnis  $I_F = I_{F\max} \cdot (t_{ein}/(t_{ein}+t_{aus}))$ . In vielen Fällen werden die PWM-Signale von externen Mikrocontrollern erzeugt. Zur Dimmung von monochromen Power-LED-Modulen errechnen die Mikrocontroller das Pulsbreitenverhältnis des Zellenstroms, um den gewünschten Strommittelwert zu erhalten.

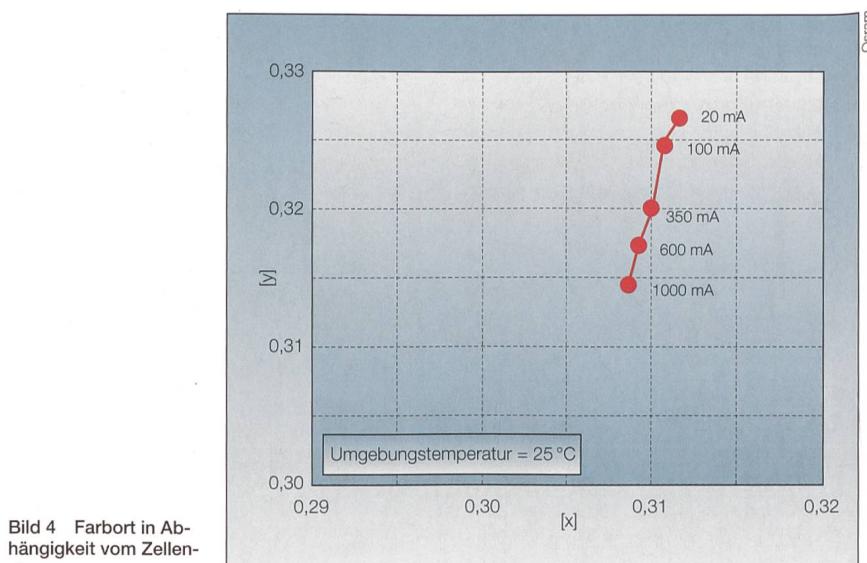


Bild 4 Farbort in Abhängigkeit vom Zellenstrom.

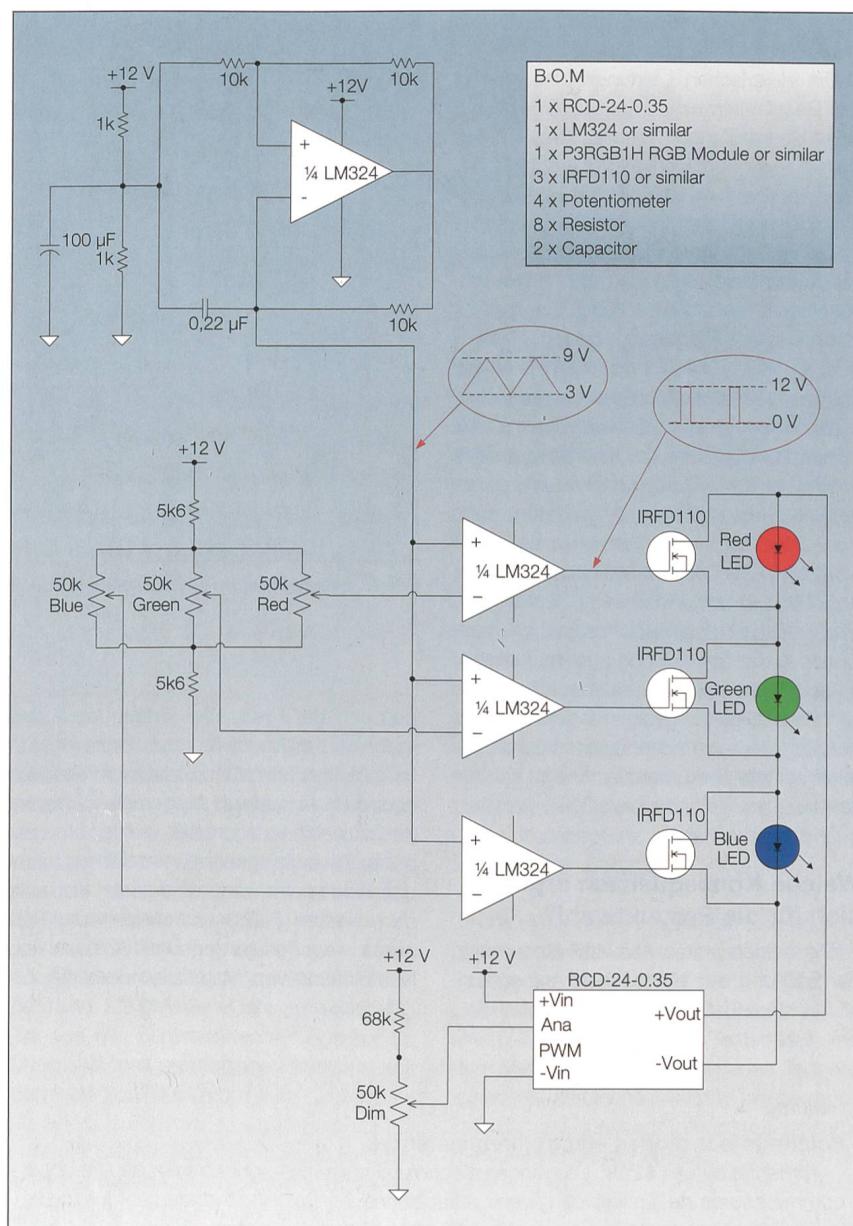


Bild 5 Applikationsbeispiel RBG-Mischung mit nur 1 Treiber.

Lampenwechsel vorzunehmen, wie Unterwasserbeleuchtungen.

Da sich die Treiber oft in unmittelbarer Umgebung der Power-LEDs befinden, ist mit einer hohen Temperaturbeanspruchung zu rechnen. Obwohl Power-LEDs eine sehr effiziente Lichtquelle darstellen, produzieren sie trotzdem Verlustleistung, die in Form von Wärme abgegeben wird. Daher müssen LED-Treiber einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, um einerseits selbst wenig Verlustleistung zu produzieren und andererseits, daraus resultierend, bei hohen Umgebungstemperaturen ohne Derating arbeiten zu können.

Nicht nur die Temperaturen, sondern auch andere Umwelteinflüsse wie Vibratiorien beeinflussen die Lebensdauer der

Elektronik. Ebenso ist eine Beständigkeit gegen hohe Luftfeuchte notwendig, um einen sicheren Betrieb in allen Klimaten zu gewährleisten. Also müssen derartige Treiber unter extremen Bedingungen die gleiche Lebensdauer erreichen wie die zu versorgenden Power-LEDs, also 50 000 bis 100 000 h.

### Wie können diese Anforderungen erfüllt werden?

Die Grundlagen für ein zuverlässiges Produkt werden bei der Spezifikation eines neuen Produkts gelegt. Dann wird festgelegt, welchen Anforderungen das Produkt genügen muss. Im Laufe der darauffolgenden Entwicklung werden diese Anforderun-

Sehr sinnvoll kann allerdings sein, beide Dimmmöglichkeiten gleichzeitig zu nutzen. Man denke hierbei an Begrenzung des Maximalstroms (z.B. in Abhängigkeit von der Temperatur) mittels Analogdimmen und Realisieren der tatsächlichen Helligkeitsregelung mittels PWM-Takten. Hiermit sind höchstmögliche Zuverlässigkeit realisierbar, da eine im thermischen Arbeitspunkt optimal eingestellte Power-LED dies mit dementsprechend längerer Lebensdauer dankt (Bild 6).

Nicht jede Beleuchtungsart ist PWM-dimmbar, wie z.B. optische Bildaufnahmeeinrichtungen (Mikroskopbeleuchtungen) oder dort, wo Stroboskopeffekte zu vermeiden sind.

### Anforderungen an die Treiber

Die Anforderungen an die Treiber lassen sich in 2 Kategorien einordnen. Die erste Kategorie befasst sich mit den elektrischen Anforderungen und die zweite mit mechanischer Festigkeit und Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen.

Zu den elektrischen Anforderungen gehört in erster Linie ein hoher Wirkungsgrad, um die Leistungsdaten der Power-LEDs nicht zu verschlechtern. Unter hohen Wirkungsgraden werden Werte über 90% verstanden. Ein weiterer Eingangsbereich unterstützt die Einsatzfähigkeit solcher Treiber in den verschiedensten Anwendungen. Eine geringe Spannungsdifferenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung ermöglicht die optimale Ausnutzung der Versorgungsspannungsquelle. Zur Steuerung des Treibers ist auch ein Steuereingang notwendig, mit dem der Treiber ein- und ausgeschaltet werden kann, wobei der Treiber nach dem Ausschalten in den Strom sparenden Stand-by-Modus geht. Eine TTL-Kompatibilität (Transistor-Transistor-Logik) ist anzustreben, da solche Applikationen oft von Mikrocontrollern aus gesteuert werden.

Das Anforderungsprofil hinsichtlich mechanischer Beanspruchung und Umweltbeeinflussung ist weit gespannt aufgrund der vielfältigen Einsatzbereiche für LED-Beleuchtungen, die von Flugfeldbeleuchtungen über variable Verkehrsanzeigen bis hin zu Beleuchtungen für Image Processing reichen. Ebenso grosses Potenzial steckt in allen etablierten Beleuchtungen, wo bisher aufgrund der Umgebungsbedingungen (z.B. Vibrationen) erhöhtes Ausfallsrisiko für konventionelle Glühlampen bestand – ein naheliegendes Beispiel sind da sämtliche schienengebundenen Transporteinrichtungen wie Signallampen an Güterzügen. Ebenso interessant sind LED-Beleuchtungen und deren Ansteuerungen in Einbauroten, wo es nicht möglich ist, schnell einen

gen ständig überprüft und die Ergebnisse bewertet und dokumentiert.

Die elektrischen Leistungsdaten sind in aller Regel relativ einfach zu überprüfen, und diese Überprüfungen werden von den Herstellern mehr oder weniger gut durchgeführt. Aber wie sieht es mit den Umweltverträglichkeits- und Zuverlässigkeitssdaten aus?

Die letztgenannten Daten sind schwieriger zu ermitteln: So dauert z.B. ein Feuchtigkeitstest 96 h, also 4 Tage. Ein Test für Hochtemperaturlagerung dauert 1000 h oder 41 Tage. Ein HALT (Highly Accelerated Life Test), bei dem nach Design- oder Prozessschwächen gesucht wird, nimmt eine schwer kalkulierbare Zeit in Anspruch. Das Wesen von HALTs ist, die Produkte durch externe Stressfaktoren zu zerstören, nach den Ursachen zu forschen und anschließend die Ursachen zu beseitigen und somit das Produkt zu verbessern. Somit wird gleich klar, dass ein solcher Test mehrere Zyklen in der Entwicklung und im Testlabor erfordert, um die gewünschten Ergebnisse zu liefern. Diese Untersuchungen verleihen dem Produkt eine hohe Zuverlässigkeit, die auch mittels Dokumenten belegt werden kann.

### Welche Konsequenzen ergeben sich für die Produktwahl?

Die beiden ersten Auswahlkriterien sind die Erfüllung der elektrischen Anforderun-

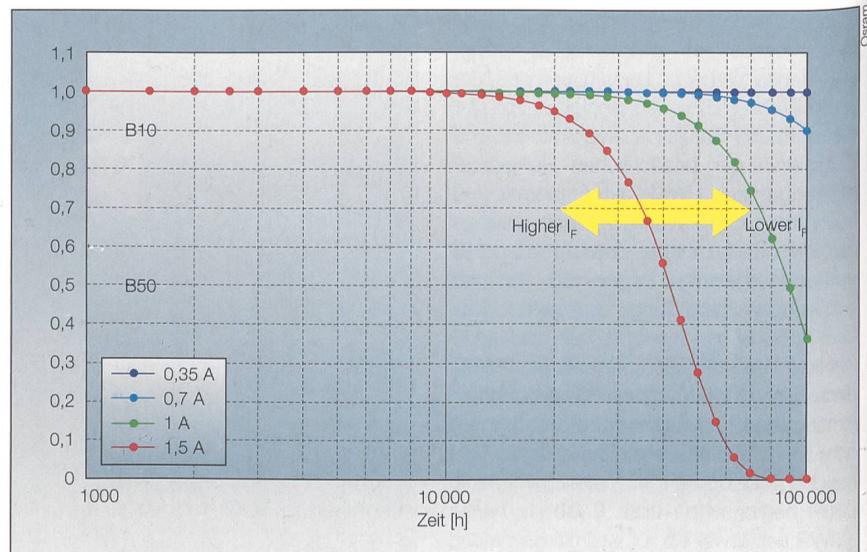


Bild 6 Lebensdauer in Abhängigkeit des Stroms.

gen und der Preis. Hier jedoch kann eine Investition in einem teureren Produkt kostengünstiger kommen. Es ist leicht einzusehen, dass ein wirklich ausgereiftes Produkt, das ausreichend getestet wurde, um eine hohe Zuverlässigkeit zu erreichen, nicht dasselbe kosten kann wie dessen Kopie. In den meisten Fällen entscheiden die Prozesse in der Fertigung und die Auswahl und Kombination von Materialien über die Zu-

verlässigkeit der Produkte. Ein drittes Kriterium schliesslich ist die Anschliessbarkeit. Nicht jede LED-Beleuchtung wird auf Platinen aufgebaut. Mitunter kann es auch gewünscht sein, hermetisch dichte Module einzusetzen, die einfach vom Elektriker mittels Kabel und Klemmanschluss verbaut werden können.

### Angaben zu den Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Christian Haudum ist technischer Leiter bei Recom Development & Trading GmbH & Co. KG.

Recom Development & Trading GmbH & Co. KG,  
A-4810 Gmunden,  
haudum@recom-development.at

Dipl.-Ing. Carl Schramm ist Leiter des Zuverlässigkeitstests von Recom Development & Trading GmbH & Co. KG.  
Recom Development & Trading GmbH & Co. KG,  
A-4810 Gmunden,  
schramm@recom-development.at

### Résumé

#### Eclairage par diodes électroluminescentes

*Alimentation des LEDs.* Les diodes électroluminescentes sont en train de s'imposer comme source de lumière de l'avenir étant donné leur excellent rendement lumineux, leur faible consommation, leur longévité et la facilité d'élimination. A quoi faut-il faire attention dans le choix de l'électronique d'alimentation afin que celle-ci soit tout aussi efficace et durable?

Anzeige

## Beleuchtungslösungen mit LED

Grundlagen, Hinweise für Planer und Installateure, Praxisberichte, Ausstellung

Fachtagung: 19. Januar 2010, ETH-Zentrum, Zürich  
Info: [www.electrosuisse.ch](http://www.electrosuisse.ch)

