

Stockholm ehrt Erfinder der blauen Leuchtdioden

Physiknobelpreis 2014 für Wegbereiter des weißen LED-LICHTS

• 2015 – das Jahr des Lichtes

Am 20. Dezember hat die UN-Generalversammlung das Jahr 2015 zum „internationalen Jahr des Lichts und der lichtbasierten Technologien“ ausgerufen. Dadurch soll an die Bedeutung von Licht als elementare Lebensvoraussetzung für Menschen, Tiere und Pflanzen und daher auch als Bestandteil von Wissenschaft und Kultur erinnert werden.

Da ist es vielleicht kein Zufall, dass der Physik-Nobelpreis für die Entwicklung der blauen Leuchtdiode im Dezember letzten Jahres im Goldenen Saal des Stockholmer Rathauses an drei Japaner verliehen wurde.

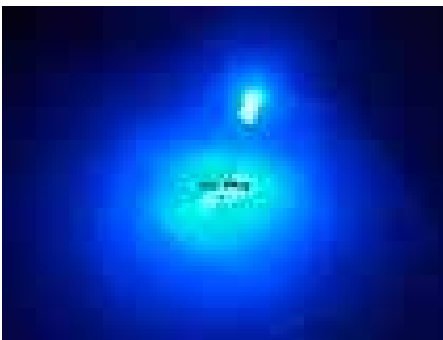


Bild 1: Blaue LED mit InGaN

Die rote LED wurde bereits Ende der Fünfzigerjahre erfunden, ein paar Jahre später folgte die grüne LED.

Die Nobelpreisträger haben vor 20 Jahren effiziente blaue Leuchtdioden erfunden, die helle und energiesparende weiße Lichtquellen möglich machten und haben damit einen fundamentalen Wandel in der Lichttechnik ausgelöst, der für die weltweite Lichtindustrie von allergrößter Bedeutung ist.

Leuchtdioden wandeln Strom direkt in Licht um. Sie sind quasi die Umkehrung einer Solarzelle.

Um weißes LED-Licht mischen zu können, fehlte aber noch eine blaue Version, denn Blau und Gelb ergeben nach der Farbenlehre Weiß.

Wissenschaftler brauchen einen langen Atem. Manchmal dauert es viele Jahrzehnte, bis die Ergebnisse einer Grundlagenforschung erste Ansatzpunkte für die angestrebte Neuerung erkennen lassen, und selbst dann ist es immer noch fraglich, ob das Ziel einer produktionsreifen und nutzbringenden Innovation überhaupt jemals erreicht wird. Nach damaligem Erkenntnisstand gab es zwei

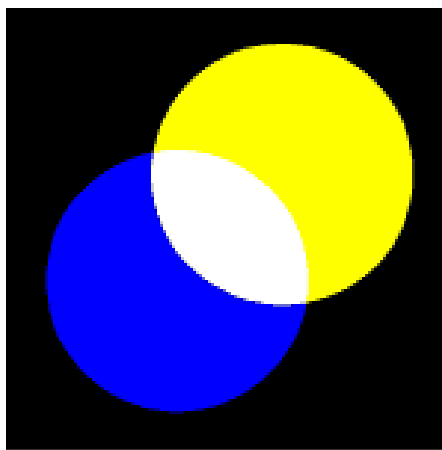


Bild 2: Blau und Gelb ergeben Weiß.

Möglichkeiten, weißes LED-Licht zu erzeugen: Entweder man überlagert das Licht einer roten, einer grünen und einer blauen LED, oder man regt mit einer blauen LED Phosphor zum Leuchten an. Beide Methoden setzen die Existenz von blauen Leuchtdioden voraus, und genau deren Herstellung wollten den Wissenschaftlern lange Zeit nicht gelingen. Trotz erheblicher Anstrengungen in Wissenschaft und Industrie blieben blaue LEDs für **drei Jahrzehnte ein ungelöstes Problem**.

So gab es einen regelrechten Wettlauf um die fehlende blaue LED. In Universitäten und Industrielabors wurde nachgedacht, getüftelt und probiert. Mit Siliziumkarbid hatte man einen bescheidenen Erfolg, aber das blaue Licht war sehr schwach. Der Weg zu brauchbaren blauen und weißen Leuchtdioden schien sehr weit.

Die Nobelpreisträger setzten nun Ende der 1980er-Jahre anders als viele Forscher-Kollegen auf Gallium-Nitrid (GaN) als Halbleitermaterial für blaue Leuchtdioden.

Isamu Akasaki und Hiroshi Amano forschten an der Nagoya-Universität in Japan.

Shuji Nakamura war Quereinsteiger; er arbeitete

bei Nichia, einem Chemieunternehmen, das u.a. Leuchtstoffe für Leuchtstofflampen herstellte und von seinen Ideen für blaue LEDs nicht gerade begeistert war.

„Schließlich durfte Nakamura aber doch eine teure Spezialmaschine für die Herstellung von Halbleitern kaufen“.

Binnen weniger Jahre gelang der Durchbruch, erste Labormuster der neuen blauen LED leuchteten hell und bereits 1993 brachte Nakamuras Arbeitgeber Nichia die ersten blauen Leuchtdioden auf den Markt, 1999 folgte die blaue Laserdiode.

„Das in blauen LEDs genutzte Material Galliumnitrid galt lange als unbeherrschbar“.

Das theoretische Potenzial des Materials zur Erzeugung blauen Lichts war jedoch seit den Siebzigerjahren in der Wissenschaft bekannt.

Die erste Schwierigkeit, an der alle Forscher zuvor gescheitert waren, war die Herstellung des Galliumnitrid-Kristalls. Es gelang den Japanern schließlich, die Kristalle auf dem Mineral Saphir zu züchten. Das zweite Problem war die p-Dotierung. In der sogenannten p-Schicht des Halbleiters fehlen Elektronen, in der n-Schicht sind sie im Überschuss vorhanden. Nach Anlegen einer Spannung wandern die Elektronen von der n-Schicht zur p-Schicht, die Elektronenlücken bewegen sich in umgekehrter Richtung. Lücken und Elektronen treffen sich in der aktiven Schicht zwischen der p- und der n-Schicht im sog. p-n-Übergang.

Bei diesem als Rekombination bezeichneten Vorgang wird Licht emittiert, dessen Wellenlänge von dem Material abhängt, aus dem der Halbleiter besteht.

Diese p-Dotierung herzustellen, erwies sich als sehr schwierig.

Den japanischen Forschern half bei der Lösung - wie so oft in der Wissenschaft - der Zufall.

„Akasaki und Amano hatten das Galliumnitrid immer wieder mit einem Elektronenmikroskop untersucht“. Dabei haben sie entdeckt, dass das Material nach der Untersuchung auf einmal die gewünschten Eigenschaften hatte.

Nakamura konnte schließlich die Erklärung dafür liefern: Durch den Beschuss mit Elektronen im Elektronenmikroskop wird Wasserstoff aus dem Kristall herausgelöst - und plötzlich funktionierte die blaue LED.

Vor etwa 20 Jahren wurde dann die erste LED vor-

gestellt, die durch Hinzufügung von Leuchtstoffen mit gelbgrünem Spektralbereich weißes Licht durch Lumineszenz-Konversion erzeugte.

Maßgeblichen Anteil an der Entwicklung hatte Professor Dr. Jürgen Schneider, langjähriger Abteilungsleiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik: Er erfand 1995 die weiß leuchtende Diode, die aus einem einzigen Halbleiter-Chip besteht.

Durch die Dosierung des Leuchtstoffs können die spektralen Anteile des blauen und des gelben Lichts eingestellt werden. So sind verschiedene Farbtemperaturen zu erreichen: Warmweiß, Neutralweiß, Tageslichtweiß usw.

2006 wurden die ersten Leuchtdioden mit 100 Lumen pro Watt entwickelt.

Dabei sind moderne LED-Leuchtmittel nicht nur hell, sondern auch sehr effizient.

Heute wird auch Indium-Gallium-Nitrogen (InGaN) für blaue LEDs verwendet.

Rein theoretisch ist es möglich eine grüne LED mit einer Wellenlänge von 555 nm mit einer Effizienz von 683 Lumen / Watt zu betreiben. (Photometrisches Strahlungsäquivalent)

Das gilt aber auch nur in der Theorie, bei der die gesamte elektrische Energie in Licht umgewandelt wird. In der Realität sieht das Ganze etwas anders aus.

Etwa 300 Lumen pro Watt sind maximal für weißes LED-Licht erreichbar. Edisons erste Kohlefaden-Glühlampe hatte nur 1,4 lm / W und die Lebensdauer betrug 40 Stunden.

Der Gasglühstrumpf hat etwa 1,6 lm / W, seine Lebensdauer beträgt 5000 Stunden. Die LED-Lebensdauer ist dagegen größer als 40.000 Stunden.

Anmerkung:

Der elektrische Strom wird häufig nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 40 % aus Primärenergie hergestellt, während die Gasbeleuchtung Primärenergie verbraucht. Deshalb muss man beim Vergleich mit elektrischen Lichtquellen noch einen Faktor von etwa 2,5 zugunsten der Lichtausbeute der Gasbeleuchtung berücksichtigen, d.h., diese steigt damit auf etwa 4 lm / W.

Die Firma CREE hat es inzwischen geschafft, im Labor eine weiße LED zu entwickeln, die etwa 250 Lumen / Watt liefert. Nichia hat vergleichbare Werte erreicht.

Aktuelle kommerzielle LED-Lichtausbeuten liegen heute bei etwa 130 lm/W. Der Wirkungsgrad einer LED ist das Verhältnis zwischen der abgestrahlten Strahlungsleistung in Watt und der aufgenommenen elektrischen Leistung in Watt. Dieser Quotient wird in der Lichttechnik auch als Strahlungsausbeute η

bezeichnet. Eine einfache Rechnung zeigt nun, wie viel elektrische Energie in Wärme und wie viel in Licht umgewandelt wird.

683 Lumen / Watt ist das theoretische Maximum, also 100 % grünes Licht.

Bei aktuellen LEDs beträgt die Strahlungsausbeute $\eta = 40 \%$

Bei einer 1 Watt LED werden demzufolge 40 % = 0,4 W in Licht und 60 % = 0,6 W in Wärme umgewandelt, und diese Wärme muss natürlich abgeleitet werden. Deshalb ist bei LEDs die passive bzw. ggf. auch aktive Kühlung für die LED-Entwärmung von signifikanter Bedeutung!

Die Wärmeabfuhr erfolgt prinzipiell durch drei physikalische Effekte!

Wärmeleitung

Da die LED-Chips sehr klein sind gegenüber klassischen Lichtquellen, muss die Wärmeabfuhr primär durch Wärmeleitung erfolgen.

Wenn moderne Keramik-Kühlkörper eingesetzt werden, können die erforderlichen elektrischen LED-Leitungen direkt auf die isolierende Keramik gesintert werden, womit sich eine hervorragende Wärmeleitung, d.h. ein sehr kleiner Wärmewiderstand ergibt.

Konvektion

Ausreichend große Leuchten-Oberflächen für den Kontakt mit der Luftströmung sind vorzusehen (Rippen, raue Struktur, poröse Materialien usw.), ggf. aktive Kühlung durch superleise Ventilatoren mit hoher Lebensdauer oder z. B. Piezo-Membranschwinger.

Strahlung

Die Leuchtenoberfläche sollte einen möglichst hohen spektralen Emissionsgrad aufweisen. Es dürfen keinesfalls blanke (polierte) metallische Oberflächen sein, da diese prinzipiell einen sehr niedrigen Emissionsgrad besitzen. Keramik-Kühlkörper besitzen einen hohen Emissionsgrad von 0,8 bis 0,9!

Bei der Glühlampe werden – wie bekannt - nur 3% in Licht umgewandelt! 97% werden überwiegend durch IR-Strahlung abgeführt.

Ein Beispiel aus der Praxis:

Ein 75 W Allgebrauchsglühlampe (Preis etwa 1,30 €) erzeugt eine Lichtmenge von

$$75 \text{ W} \times 12 \text{ lm} / \text{W} \times 1000 \text{ h} = 900.000 \text{ lmh}$$

Eine typische 11 W LED-Retrofitlampe (Preis etwa 13 €, Tendenz fallend) liefert dagegen

$$11 \text{ W} \times 96 \text{ lm} / \text{W} \times 20.000 \text{ h} = 21.120.000 \text{ lmh}$$

wobei Lichtausbeute und Lebensdauer eine steigende Tendenz aufweisen.

Der Lichtmengen-Gewinnfaktor gegenüber der 75 W Allgebrauchsglühlampe beträgt

$$G = 23 = 21.120.000 \text{ lmh} / 900.000 \text{ lmh}$$

23 Allgebrauchsglühlampen mit 75 W (Preis 23 x 1,30 € = 30 €) erzeugen also dieselbe Lichtmenge

wie eine 11 W LED-Retrofitlampe. Die 11 W LED-Retrofitlampe dürfte demzufolge bis zu 2,3 x 13 € = 30 € kosten, um dieselbe Lichtmenge zu liefern

wie 23 75 W Glühlampen. Hierbei ist noch nicht der personelle Aufwand der Beschaffung und Auswechslung der 23 Glühlampen berücksichtigt.

Der LED-Retrofitlampen-Preisreduktionsfaktor ist hier also 30 € / 13 € = 2,3! Interessant sind auch die Angaben lm / € und lmh / €

75 W Allgebrauchsglühlampe:

$$(75 \text{ W} \times 12 \text{ lm} / \text{W}) / 1,30 \text{ €} = 900 \text{ lm} / 1,30 \text{ €} = 692 \text{ lm} / \text{€}$$

$$\text{und } 900.000 \text{ lmh} / 1,30 \text{ €} = 692.000 \text{ lmh} / \text{€}$$

11 W LED-Retrofitlampe:

$$(11 \text{ W} \times 96 \text{ lm} / \text{W}) / 13 \text{ €} = 1056 \text{ lm} / 13 \text{ €} = 81 \text{ lm} / \text{€}$$

$$\text{und } 21.120.000 \text{ lmh} / 13 \text{ €} = 1.624.615 \text{ lmh} / \text{€}$$

Die 11 W LED-Retrofitlampe liefert also die 2,35-fache Lichtmenge pro Euro!

Lichtwelligkeit, Flimmern, Flickern und Stroboskopeffekte bei LED-Applikationen

Es gibt DC-Licht und (DC+AC)-Licht.

Die Sonne liefert ein langsam veränderliches Gleichlicht (DC-Licht, Analog-Licht) ohne Wechsellichtkomponenten (AC-Licht). Das Auge ist hieran seit Jahrmillionen angepasst.

Entladungslampen mit dimmbaren elektronischen HF-Vorschaltgeräten erzeugen ebenfalls ein Gleichlicht ohne nennenswerten Wechsellichtanteil.

Interessant ist ein Lichtmengen - Vergleich:

Eine 1 Watt-Edison-Kohlefaden-Glühlampe liefert 1,4 lm x 40 h = 56 lmh

Ein 1 Watt-Gasglühstrumpf liefert 4 lm x 5000 h = 20.000 lmh

Eine 1 Watt-LED liefert 130 lm x 40.000 h = 5.200.000 lmh

Der Lichtmengen-Gewinnfaktor G gegenüber Edisons Glühlampe von 1878 beträgt

$$G = 93.000 = 5.200.000 \text{ lmh} / 56 \text{ lmh}$$

Bei der Dimmung von LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation (PWM), entsteht eine erhebliche Lichtwelligkeit WLED.

Der PWM - Dimmbetrieb kann deshalb als gravierend nachteilig z. B. gegenüber dimmbaren elektronischen HF-Vorschaltgeräten für Entladungslampen eingestuft werden.

Hierbei gilt $WLED = \frac{1}{D}$ mit $1 \leq WLED < \infty$

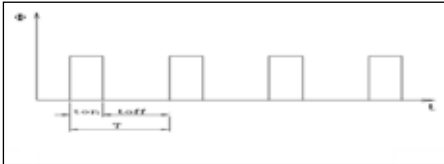


Bild 3. PWM-Verfahren (PWM = Pulsweitenmodulation)

Wichtig ist die Ermittlung von Grenzwerten für die Betriebsparameter der durch Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuerten Leuchtdioden (LED), die als Leuchtmittel in geschlossenen Räumen (z.B. in Flugzeugkabinen) eingesetzt werden. Speziell sind dies die Grenzwerte von Betriebsparametern für das Auftreten negativ empfundener Erscheinungen wie Flimmern der Helligkeit, aber auch Kopfschmerzen und Unwohlsein. Derartige Betriebsparameter sind z.B. das Tastverhältnis und die Modulationstiefe, jeweils gemessen in Abhängigkeit von PWM-Frequenz und mittlerer Helligkeit

Nachteile des PWM – Dimmverfahrens:

1. Interferenzen mit anderen Lichtquellen möglich, wie z.B. Video-Bildschirmen, Probleme bei TV-Aufnahmen und Fotos mit Digitalkameras usw.
2. Der Stroboskopeffekt beim Dimmen von LEDs mit Pulsweitenmodulation (PWM) wird als Hauptursache für Unzufriedenheit und mögliche Augenmüdigkeit identifiziert. Das natürliche Tageslicht (DC-Licht) ist dagegen ein langsam veränderliches Gleichlicht
3. Höhere Strombelastung der LED-Sperrschicht, dadurch höhere Sperrschichttemperatur, geringere Lichtausbeute und Lebensdauer
4. Ungünstige EMV, da steile Strom- und Spannungsflanken auftreten, diese PWM-Pulse erzeugen ein breitbandiges elektrisches Störspektrum!
5. Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche (Elektro- und Magnetostruktion)

Beim Analogdimmen werden die LEDs statt mit Pulsweitenmodulation (PWM) mit einem kontinuierlich regelbaren Konstant-Gleichstrom gedimmt, d.h. es entsteht nur eine geringe Lichtwelligkeit!

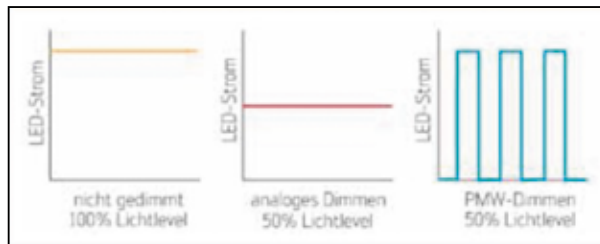
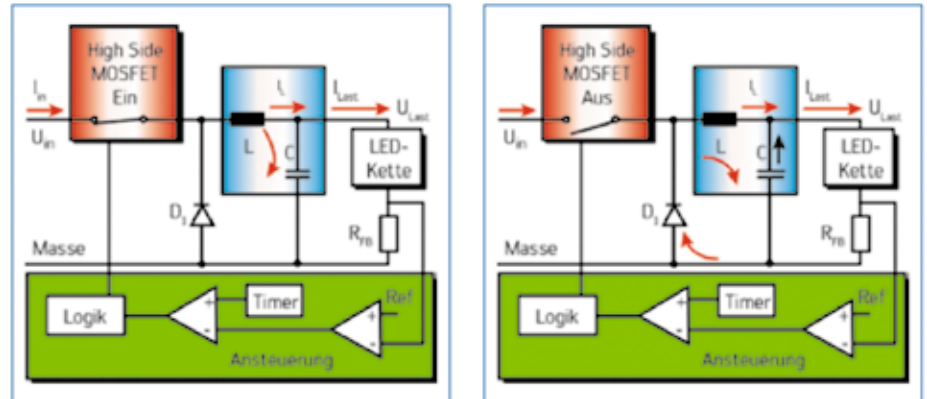


Bild 4: Analog-Dimmen (rot) und PWM-Dimmen (blau)



$$I = \int j \, dt$$

Bild 5. Schaltung für analoges Dimmen des LED-Stroms I_{LED}

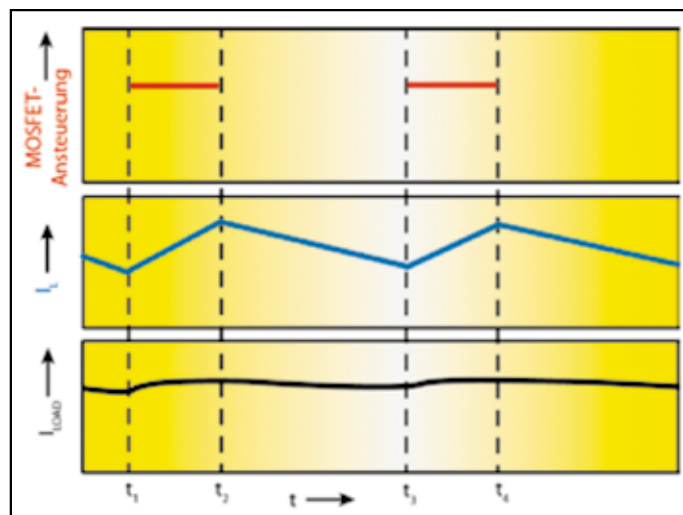


Bild 6: Signaldiagramm für analoges Dimmen des LED-Stroms

Arbeitsweise der LED-Stromregelung. Bei durchgeschaltetem MOSFET (Bild 5, links) fließt Strom durch die LED-Kette, ein Teil lädt den Kondensator C auf. Nach dem Abschalten (Bild 5, rechts) treiben Spule L und Kondensator C den Strom $I_{LED} = I_{Load}$ durch die LED-Kette. Sinkt dieser unter den Schwellwert, schaltet das IC den MOSFET wieder ein. Der Dimmgrad wird durch die variable Referenzspannung eingestellt.

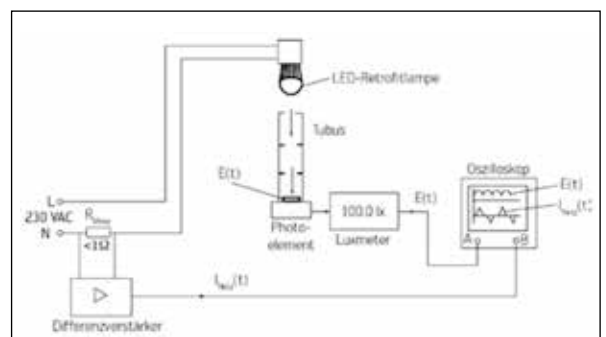


Bild 7: Geräteanordnung zur Messung der Lichtwelligkeit



Bild 8. Messaufbau zur Bestimmung der Lichtwelligkeit

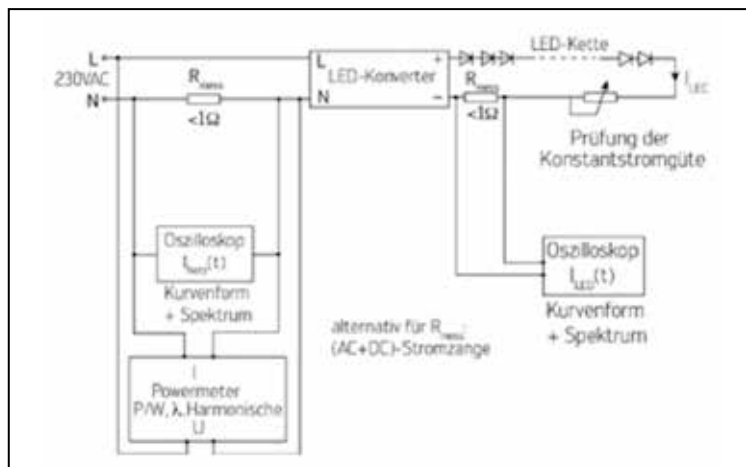


Bild 9: Schaltungsaufbau zur Untersuchung von LED-Konvertern

In Herstellerkatalogen sollten die folgenden relevanten technischen Daten von LED-Leuchten enthalten sein:

Photometrische Daten:

Lichtstrom, LVK,
Leuchtenlichtausbeute, Lichtwelligkeit
Blendungsbegrenzung, TI-Wert < 15%

Spektrometrische Daten:

CCT, CRI, x,y, Spektrum

Thermische Daten:

LED- Junction-Temperatur T_J
(Richtwert: $T_J < 85^\circ\text{C}$)
zulässige Umgebungstemperatur T_{amb}

Elektrische Daten:

Wirkleistung, Leistungsfaktor, THD

LED-Parameter, wie Lichtausbeute, Lebensdauer (MTTF) und Farbkoordinaten (Lichtfarbe) werden negativ beeinflusst bei steigender Chiptemperatur.

Die LED ist nun die Lichtquelle des 21. Jahrhunderts

Sie ist langlebig und sie kommt anders als Energiesparlampen ohne giftiges Quecksilber aus. Damit schufen die Wissenschaftler die grundlegende Voraussetzung für eine LED-Lichttechnologie, die ökonomisch wie ökologisch mit Spitzenleistung überzeugt und wie keine andere die umweltorientierten Energiesparziele der Gegenwart weltweit stützt und fördert.

Inzwischen gibt es auch UV-LEDs. Damit kann man eine „Halbleiter-Leuchtstofflampe“ herstellen, denn in der herkömmlichen Leuchtstofflampe dient bekanntlich die UV-Strahlung der Quecksilber-

Entladung zur Lichtaussendung des Leuchtstoffs. Für Autoscheinwerfer gibt es neben weißen LEDs nun auch blaue LASER-Dioden. Damit werden Fernlicht-Reichweiten bis 500 m erreichbar. Eine helle Zukunft ist somit garantiert. Licht kann sich jeder leisten, solarbetriebene LED-Leuchten für ein paar Euro zeigen, wie billig die neue Lichttechnik schon ist. Und in diesem Sinne hat die Erfindung vielleicht auch eine Schattenseite. Preiswertes weißes Licht aus sehr langlebigen Leuchtmitteln kann zu einem sorglosen Umgang mit diesem Produkt verführen, d.h. die Lichtverschmutzung der Welt wird durch die weißen LEDs wahrscheinlich zunehmen und zu einem weiteren Verlust der Nacht beitragen.

Autor:
Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, www.mx-electronic.com,
info@mx-electronic.com