

Umweltfreundliche Lichtquellen

Seit Edison hat sich einiges getan, doch immer noch gilt es, Lampen mit möglichst umweltverträglichen Stoffen energiesparender zu machen.

Matthias Born und Thomas Jüstel

Weltweit werden jährlich rund 14 Milliarden Lichtquellen verkauft mit einem Marktvolumen von etwa 23 Milliarden Euro. Den Löwenanteil machen dabei die Glüh- und Halogenlampen aus, die das Licht nur sehr ineffizient erzeugen. Da etwa 20 % des weltweiten Bedarfs an elektrischer Energie für Lampen benötigt werden, birgt die Lichterzeugung ein riesiges Energie-sparpotenzial: Durch den Einsatz effizienterer Lichtquellen wie Gasentladungslampen und Leuchtdioden (LEDs) ließe sich bis zu 70 % der Energie zur Lichterzeugung einsparen. Die zentrale Aufgabe der Forschung ist es, Lichtquellen zu entwickeln, die hocheffizient sind und gleichzeitig aus umweltverträglichen Materialien bestehen, also etwa Gasentladungslampen, die ohne Quecksilber auskommen, und LEDs mit besserer Energieeffizienz und höherer Lichtausbeute.

Seit der Erfindung der Glühlampe Ende des 19. Jahrhunderts durch Edison sind elektrische Lichtquellen ein selbstverständlicher und unverzichtbarer Teil unseres täglichen Lebens geworden. Je nach Einsatzgebiet stehen verschiedene Lichtquellen zur Verfügung: Glüh- und Halogenlampen findet man überwiegend in privaten Haushalten zur Innen- und Außenbeleuchtung. Zur Beleuchtung von Geschäften und öffentlichen Gebäuden werden hauptsächlich Fluoreszenzlampen verwendet. Hochdruckgasentladungslampen kommen sowohl bei Spezialanwendungen (z. B. Projektoren) als auch verbreitet in der Straßenbeleuchtung vor. Ein Großteil des für die Lichterzeugung aufgewendeten Energiebedarfs entfällt auf ca. 11 Milliarden Glüh- und Halogenlampen mit vergleichsweise hohem Energieverbrauch. Weiter entwickelte Lichtquellen können hier ansetzen und einen entscheidenden Beitrag zur Schonung der begrenzten Ressourcen leisten.

Technologien zur Lichterzeugung

In heutigen Lampentypen wird Licht auf drei verschiedenen Arten erzeugt: durch Strahlungsemission eines Festkörpers im thermischen Gleichgewicht, durch Stoßanregung von Atomen, Ionen oder Molekülen in der Gasphase, oder durch Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern in Festkörpern.



Abb. 1: Heute sind viele verschiedene Lampentypen auf dem Markt. Prinzipiell wird Licht jedoch nur auf drei Arten erzeugt: erstens durch Strahlungsemission eines Festkörpers im thermischen Gleichgewicht (a: Halogen- oder Glühlampe), zweitens durch Stoßanregungen von Atomen, Ionen oder Molekülen in der Gasphase

(b: Leuchtstoffröhre, c: Energiesparlampe, d: Hochdrucklampe mit keramischem Wandmaterial, e: Hochdruck-Autoscheinwerferlampe), oder drittens durch Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern in Festkörpern (f: LED mit pyramidenförmigem All-GaP-Halbleiterchip).

Schwarzkörperstrahlung

Das wohl bekannteste und zugleich älteste Prinzip der elektrischen Lichterzeugung nutzt die Strahlungsemission eines Festkörpers im thermischen Gleichgewicht. Von Schwarzkörperstrahlern spricht man, wenn deren emittierte Strahlung dieselbe Temperatur wie der Festkörper selbst hat. Das Maximum des Emissionsspektrums verschiebt sich dann mit steigender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz); das emittierte Spektrum wird durch die Planck-Verteilung beschrieben.

Glüh- und Halogenlampen (Abb. 1a) sind näherungsweise eine praktische Realisierung eines Schwarzkörperstrahlers. In beiden Lampentypen wird eine Metallwendel, meistens aus Wolfram, durch Widerstandsheizung auf 2600 bis 3400 K erhitzt. Dadurch entsteht Strahlung im sichtbaren und überwiegend im infraroten Spektralbereich. Da der Anteil an sichtbarem Licht mit steigender Temperatur zunimmt, soll die Wendel-

Priv.-Doz. Dr. Matthias Born,
Dr. Thomas Jüstel,
Philips Forschungslaboratorien, Weisshauptstraße 2,
52066 Aachen

temperatur aus Effizienzgründen möglichst hoch sein. Damit geht jedoch ein hoher Wolfram-Dampfdruck, und somit eine reduzierte Lebensdauer einher. Die Betriebstemperatur der Glühwendel stellt daher nur einen Kompromiss aus Effizienz und Lebensdauer dar.

Die Abdampftrate des Wolframs lässt sich zum Beispiel durch ein geeignetes Füllgas reduzieren, das den diffusiven Wolframtransport zur Wand kontrolliert. Dieses Prinzip kommt beispielsweise in Kryptonlampen zur Anwendung. In Halogenlampen nutzt man dagegen einen chemischen Kreisprozess aus, bei dem das verdampfte Wolfram als Halogenid wieder zurück zur Wendel transportiert wird. Dadurch lassen sich deutlich höhere Wendeltemperaturen bzw. Effizienzen oder höhere Lebensdauern erzielen. Trotz dieser Verbesserungen ist die Lichtausbeute von Glüh- und Halogenlampen von bis zu 25 lm/W vergleichsweise niedrig.¹⁾ Ein möglicher Durchbruch hin zu hocheffizienten Glüh- und Halogenlampen wird zur Zeit heiß diskutiert: der Aufbau eines dreidimensional strukturierten Wolframfestkörpers, der eine sog. photonische Bandlücke im IR-Bereich zwischen 8 und 20 μm aufweist [1]. Auf diese Weise könnte die Infrarotemission von Glüh- und Halogenlampen entscheidend verringert werden und die Effizienz von 5 % auf bis zu 60 % steigen. Doch stehen der Massenproduktion eines solchen strukturierten Wolframkristalls derzeit noch einige Hürden im Weg.²⁾

Elektrische Gasentladungen

Das Prinzip der Lichterzeugung in Gasentladungen beruht auf der Anregung von Atomen, Ionen oder Molekülen in der Gasphase durch Stoßprozesse. Man unterscheidet dabei Stöße jenseits des thermischen Gleichgewichts von denen nahe oder im thermischen Gleichgewicht. Im ersten Fall, der bei Niederdruck-Gasentladungen zutrifft, erhalten die Elektronen aufgrund ihrer großen mittleren freien Weglänge, die bei Drücken von wenigen Pascal im Bereich des Entladungsdurchmessers liegt, Energien von einigen Elektronenvolt. Sie regen die kalten Quecksilberatome durch inelastische Stöße an, woraufhin Resonanzstrahlung bei einer Wellenlänge von 185 und 254 nm emittiert wird. Die UV-Strahlung wird durch Leuchtstoffe an der Innenseite des Entladungsgefäßes in sichtbares Licht konvertiert. Neben Quecksilber kommen auch Edelgase wie Neon oder Xenon oder Metalle wie z. B. Natrium zum Einsatz (Abb. 1b/1c).

Bei Betriebsdrücken von über 40 kPa nähern sich die Temperaturen von geladenen und neutralen Spezies aufgrund der geringeren mittleren freien Weglängen und den damit resultierenden erhöhten Stoßfrequenzen aneinander an: Das Plasma befindet sich nun nahe am thermischen Gleichgewicht und die Besetzung der Energieniveaus wird durch eine Boltzmann-Verteilung beschrieben. Dies ist der Bereich der so genannten Bogenentladungen, in denen maximale Plasmatemperaturen von 5000 bis 10 000 K vorliegen. Ein Teil der im Plasma deponierten Energie geht durch Verlustprozesse wie Wärmeleitung, Strahlungstransport, Konvektion und Diffusion verloren. Der auf die Gefäßwand auftreffende Wärmefluss führt zu Wandtemperaturen von etwa 1000 bis 1300 K. Daher sind Wände aus Quarz oder keramischen Festkörpern notwendig. Bei diesen vergleichsweise hohen Temperaturen können aber auch weniger flüchtige bzw. nur schwer verdampfbare Spezies in die Gasphase gelangen: In Bogen- bzw. Hoch-

druck-Gasentladungslampen werden daher Metalle oder flüchtige Metallhalogenide, z. B. NaI und Selten-erdhalogenide, wie DyI_3 , HoI_3 , TmI_3 , verwendet (Abb. 1d). In den so genannten Xenon-Lampen für Autoscheinwerfer entsteht das charakteristische blauweiße Licht durch ScI_3 (Abb. 1e). Der Vorteil derartiger Spezies liegt in ihrer geringen Anregungsenergie von wenigen Elektronenvolt, was eine effiziente Abstrahlung im sichtbaren Spektralbereich ermöglicht. Da sowohl Atom- als auch Molekülübergänge zur Emission beitragen, entsteht ein quasikontinuierliches Spektrum. Daher ist auch die Farbwiedergabe solcher Metallhalogenidlampen sehr gut.

Lichterzeugung in Festkörpern

Die Lichterzeugung im Festkörper beruht auf der Rekombination von positiven und negativen Ladungsträgern (Löcher und Elektronen). Nach der chemischen Natur der verwendeten Materialien und dem Aufbau der Leuchtdioden (LEDs) unterscheidet man heutzutage organische LEDs (OLEDs), Polymer-LEDs (PLEDs) und anorganische Halbleiter-LEDs. Bei den ersten beiden Technologien findet die Ladungsträgerkombination in einem amorphen Festkörperfilm statt, der sich zwischen einer Loch- und einer Elektroneninjektionsschicht befindet.

Obwohl OLEDs und PLEDs seit vielen Jahren intensiv untersucht werden, finden sie sich bis heute nur in Bildschirmen zur Hintergrundbeleuchtung. Für Anwendungen in der Allgemeinbeleuchtung reichen die Stabilität und Flächenhelligkeit sowie die Lebensdauer von ca. tausend Stunden noch nicht aus. Halbleiter-LEDs erreichen hingegen schon heute ein Vielfaches davon. Ihr wesentliches Element ist ein pn-Übergang in einem hochkristallinen Festkörper wie InP oder GaN. Sobald eine Vorwärtsspannung an diese Struktur angelegt wird, werden Elektronen von der elektronenleitenden n-Schicht in die lochleitende p-Schicht und Löcher von der p-Schicht in die n-Schicht injiziert. Demnach können sich ein Elektron und ein Loch an der selben Stelle aufhalten, allerdings getrennt durch Energie und Impuls.

Sie können nur dann rekombinieren, wenn Energie und Impuls erhalten bleiben. Die Einhaltung des Energieerhaltungssatzes wird durch die Emission eines Photons mit einer der Bandlückenenergie entsprechenden Energie gewährleistet. Die Impulserhaltung erfordert, dass Elektronen nur mit Löchern mit entgegengesetztem Impuls rekombinieren können. Da es einige Zeit dauern kann, bis ein Elektron ein entsprechendes Loch „findet“, besteht eine endliche Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron in einem Kristalldefekt gespeichert wird. Dieses lokalisierte Elektron kann dann mit einem Loch rekombinieren. Dabei geht allerdings Energie durch die Anregung von Gitterschwingungen (Wärme) verloren. Für die interne Quantenausbeute einer LED ist daher eine geringe Defektdichte bzw. hohe Kristallinität entscheidend. Bei den heute verwendeten LEDs liegt sie zwischen 10 % und 50 %. Die Verluste werden durch Kristalldefekte und -dislokationen bestimmt. Kürzlich gelang es zu zeigen, dass die interne Quantenausbeute einer AlGaInP-LED (650 nm) durchaus das theoretische Limit von 100 % erreichen kann [2].

Die externe Quantenausbeute wird nicht nur durch die interne Quantenausbeute, sondern auch wesentlich durch die Auskopplung von Photonen aus dem Chip bestimmt. Da LED-Halbleitermaterialien einen recht

1) Unter Lichtausbeute versteht man hier den Quotienten aus der mit der Augenempfindlichkeit gewichteten abgestrahlten Strahlungsleistung und der elektrischen Eingangsleistung.

2) siehe Physik Journal, Juli/August 2002, S. 18

hohen Brechungsindex n von 2,9–3,6 aufweisen, wird ein beträchtlicher Teil der am pn-Übergang emittierten Lichtquanten an der inneren Oberfläche des Halbleiters totalreflektiert. An Hand einfacher Überlegungen lässt sich ableiten, dass in einem kubischen Chip, der in Epoxydharz ($n = 1,5$) eingebettet ist, nur rund 25 % der Photonen ausgekoppelt werden. Der Rest geht durch Absorption an schwach reflektierenden Oberflächen (elektrische Kontakte), an Kristalldefekten und in der aktiven Schicht selbst verloren.

Eine Chipgeometrie, welche die Totalreflexion deutlich reduziert, kann daher entscheidend die externe Quantenausbeute verbessern. Das bis heute beste Chipdesign hat die Form einer stumpfen Pyramide (Abb. 1f). Ihre nicht parallelen Flächen sorgen für eine geringe innere Totalreflexion. Dies ermöglicht rote AlGaInP-LEDs mit einer externen Quantenausbeute von 55 % und einer Lichtausbeute von 100 lm/W.

Energie- und Umweltaspekte

Sowohl Quecksilber-Niederdrucklampen als auch Metallhalogenidlampen erreichen heute Lichtausbeuten von 100 lm/W und mehr. Dies entspricht dem vier- bis fünffachen konventioneller Glüh- bzw. Halogenlampen (Abb. 2). Diese Fortschritte gehen im Niederdruckbereich wesentlich auf die Entwicklung hocheffizienter Leuchtstoffe sowie spezieller Beschichtungen zurück. Im Hochdruckbereich haben widerstandsfähige keramische Wandmaterialien wie polykristallines Aluminiumoxid die Produkte stetig verbessert.

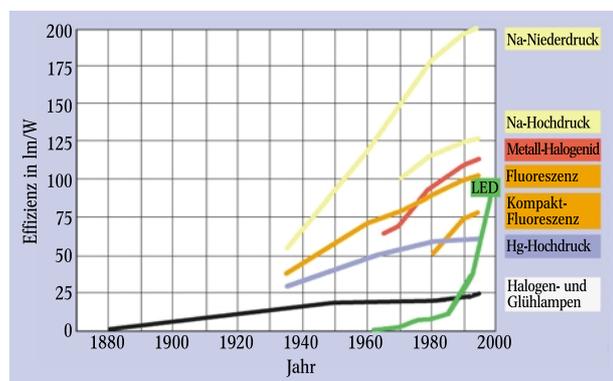


Abb. 2: Die Glühlampe ist zwar die älteste elektrische Lichtquelle, schneidet bei der Effizienz aber schlechter ab als alle anderen Lichtquellen.

In Deutschland werden etwa 8 % der elektrischen Energie von Lichtquellen verbraucht, was vier Kraftwerken mit einer Leistung von je 1 GW entspricht. Weltweit liegt diese Zahl bei ca. 80 Kraftwerken. Würde man Glüh- und Halogenlampen vollständig durch Lichtquellen mit einer Lichtausbeute von etwa 100 lm/W ersetzen, so ließe sich bis zu 70 % dieser Energie einsparen.

Neben diesem Aspekt kommt auch der Vermeidung umweltschädlicher Materialien, insbesondere in Gasentladungs-Lichtquellen, eine zentrale Rolle zu. Wie wir sehen werden, sind bislang sowohl Nieder- als auch Hochdrucklampen auf das giftige Schwermetall Quecksilber angewiesen. Ziel ist es, diesen Anteil zu verringern bzw. vollständig zu vermeiden. Die in Lampen eingefüllte Quecksilbermenge beträgt weltweit etwa 50 Tonnen pro Jahr. Für eine Bilanz muss man andererseits aber auch berücksichtigen, dass bereits bei der Stromerzeugung Quecksilber emittiert wird: in ei-

nem Kraftwerk mit einem Kohleanteil von 55 % und einem Quecksilberanteil der Kohle von 0,1 ppm etwa 54 ng pro Wattstunde, das dann beispielsweise in den Boden oder in das Grundwasser gelangen kann.

Bei Fluoreszenzlampen wurde die eingefüllte Quecksilbermenge in den vergangenen 20 Jahren von durchschnittlich 15 mg auf 3 mg reduziert. Hierdurch ließ sich das so genannte Quecksilberäquivalent in der Lampe von 0,33 auf 0,1 ng pro Lumen und Stunde verbessern. Das auf die Energieerzeugung zurückzuführende Quecksilberäquivalent ist jedoch um einen Faktor sechs höher. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringeren Effizienz und Lebensdauer lassen sich Kompaktfluoreszenzlampen, die auch als Energiesparlampen bekannt sind, noch weiter verbessern (Abb. 1c).

Bei Quecksilber-Hochdrucklampen sind die Werte wegen der vergleichsweise langen Lebensdauern ebenfalls günstiger. Dies trifft auch auf Metallhalogenidlampen zu, deren hohe Effizienz sich zusätzlich vorteilhaft auswirkt. Daher ist das gesamte Quecksilberäquivalent von Natriumhochdrucklampen praktisch ausschließlich durch den Energieverbrauch bestimmt. Gleiches gilt für Glühlampen, deren Äquivalent etwa um einen Faktor vier über denen der Vergleichslampen liegt. So trägt die Glühbirne, obwohl sie überhaupt kein Quecksilber enthält, aufgrund ihrer geringen Lichtausbeute zu einer höheren Quecksilberanreicherung in der Umwelt bei als andere Lampentypen.

Quecksilber-Reduktion in Niederdruck-Entladungslampen

Die starke Position von Fluoreszenzlampen am Lichtquellenmarkt lässt sich auf ihre hervorragende Energieeffizienz, lange Lebensdauer und gute Farbwiedergabe zurückführen. Aufgrund der hohen Energieeffizienz und des geringen Materialeinsatzes, der zur Erzeugung von einem Lumen Licht notwendig ist, werden Fluoreszenzlampen mehr und mehr als „grüne Produkte“ positioniert.

Paradoxiereweise erfordert die hohe Energieeffizienz aber den Einsatz von Quecksilber. In Niederdruckentladungen strahlen die Elemente Quecksilber und Natrium am effizientesten. Zudem stehen heute Leuchtstoffe mit einer Quanteneffizienz von beinahe 100 % zur Verfügung, um die UV-Strahlung (185 und 254 nm) der Quecksilberentladung in ein geeignetes sichtbares Spektrum mit hoher Farbwiedergabe und hohem Lumenäquivalent umzuwandeln (Abb. 3).

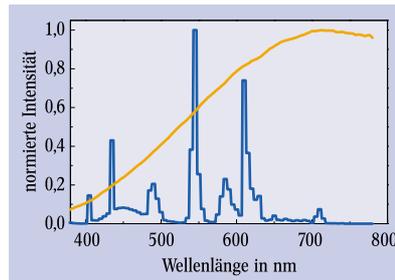
Mit diesen so genannten trichromatischen Leuchtstoffmischungen erreichen Fluoreszenzlampen eine Energieeffizienz von 30 %, entsprechend einer Lichtausbeute von 90–100 lm/W. Da ein großer Teil der Umweltbelastung von Fluoreszenzlampen auf den Energieverbrauch zurückgeht [3], der bei Niederdruckentladungen in Edelgasen wie Neon oder Xenon höher ist, lässt sich der Einsatz von Quecksilber in Fluoreszenzlampen nicht vermeiden. Trotz der Möglichkeit zu recyceln, sollte die Quecksilberdosierung reduziert werden. Dieser Weg ist in den letzten 15 Jahren in der Tat beschritten worden. Eine Fluoreszenzlampe mit 6 W enthält heute nur noch 3 mg Quecksilber. Für den optimalen Betrieb würden jedoch rund 50 μg Quecksilber ausreichen, sodass sich diese Menge im Prinzip noch weiter um einen Faktor 60 reduzieren lässt.

Die enorme Überdosierung ist wegen der Adsorption des Quecksilbers durch Lampenkomponenten nötig. Dieser Verbrauch bestimmt in erster Linie die Queck-

silbermenge, die notwendig ist, um die spezifizier- te Lebensdauer zu erreichen. Im Wesentlichen wird Hg^+ durch das Lampenglas aufgenommen (ca. 5 mg nach 15 000 Betriebsstunden), aber auch durch Leuchtstoffe und Elektrodenmaterialien.

Alle Untersuchungen zum Verbrauch im Lampenglas zeigen, dass Na^+ -Ionen im Weichglas hierbei eine entscheidende Rolle spielen [5]. Die Aufnahme von Hg^+ -

Abb. 3: Spektrum einer Fluoreszenzlampe mit 36 W (blaue Kurve) im Vergleich mit dem Spektrum einer Halogenlampe der gleichen Leistung (orange Kurve)



Ionen wird durch die Abgabe von Na^+ -Ionen ladungs- kompensiert. Lampen mit Na-freiem Glas zeigen einen deutlich geringeren Hg-Verbrauch. Allerdings ist diese Lösung aus Kostengründen nicht praktikabel.

Besser ist die Verwendung einer Beschichtung, denn es ist schon lange bekannt, dass auch die Leuchtstoffe je nach chemischer Zusammensetzung und Morphologie den Hg-Verbrauch der Lampen beträchtlich reduzieren können. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass Hg^+ -Ionen gar nicht erst die Gefäßwand erreichen oder beim Kontakt mit der Beschichtung neutralisiert werden, sodass sie wieder in die Gasentladung gelangen. Da die Leuchtstoffschicht aus 1–10 μm großen Partikeln besteht, hat sie je nach Qualität der Beschichtungstechnik eine bestimmte Porendichte, durch die Hg^+ -Ionen zum Glas gelangen können. Darum verwenden heute alle großen Lampenhersteller eine Vorbeschichtung, die aus Al_2O_3 - oder Y_2O_3 -Nanopartikeln besteht. Diese recht basischen Substanzen sind in der Lage, Elektronen an ihrer Oberfläche abzugeben [6], wodurch intermediär adsorbierte Hg^+ -Ionen neutralisiert und wieder freigesetzt werden. Zudem lässt sich durch die Verwendung von Nanopartikeln eine nahezu diffusionsdichte Beschichtung des Lampenglases erreichen.

Eine weitere technische Maßnahme besteht in der geeigneten Auswahl von Leuchtstoffen. Beispielsweise haben Leuchtstoffe mit einer leichten Elektronenabgabe an der Oberfläche einen niedrigen Hg-Verbrauch. Dies ist bei Y_2O_3 :Eu und Aluminaten der Fall. Darüber hinaus kann man auch die Leuchtstoffpartikel mit Al_2O_3 oder Y_2O_3 beschichten. Durch diese Maßnahmen lassen sich heute Fluoreszenzlampen mit einem Hg-Verbrauch von weniger als 3 mg bei einer Betriebsdauer von 15 000 Stunden realisieren.

Weitere Untersuchungen zur Hg-Reduktion befassen sich zur Zeit mit den Eigenschaften des auf den Elektroden aufgetragenen Emittermaterials. Dieses besteht aus einem Gemisch von Erdalkalioxyden (CaO - SrO - BaO). Der Emitter gibt je nach Betriebsbedingungen [4] mehr oder weniger metallisches Ba an die Gasphase ab, das dann mit Hg zu Bariumamalgam reagieren kann und zu einem erhöhten Quecksilberverbrauch führt.

Elimination des Quecksilbers in Hochdruck-Entladungslampen

In reinen Quecksilber-Dampflampen, wie z. B. der von Philips entwickelten UHP-Lampe [7], die in Projektionssystemen eingesetzt wird, herrschen Betriebsdrücke von über 100 bar. Dies ist für die Erzeugung quasikontinuierlicher Strahlung bzw. molekularer Strahlung notwendig. Dabei erfordert der extrem kleine Elektrodenabstand von nur etwa einem Millimeter ein hinreichend hohes elektrisches Feld bzw. eine hohe Brennspannung. Derzeit enthalten aber auch generell Hochdruck-Gasentladungslampen Quecksilber, da es eine hohe elektrische Leistungsdichte p_{el} im Plasma ermöglicht.

Um hohe Leistungen in das Plasma einkoppeln zu können, muss die elektrische Leitfähigkeit σ des Plasmas nach dem Jouleschen Gesetz $p_{el} = j^2/\sigma$ möglichst gering sein. Nach dem Ohmschen Gesetz $j = \sigma E$ geht dies mit hinreichend hohen elektrischen Feldern bzw. Brennspannungen einher. Die elektrische Leitfähigkeit des Bogens ist eine Funktion der Elektronendichte n_e und der Stoßfrequenzen zwischen Elektronen und Neutralteilchen bzw. geladenen Teilchen, wobei aufgrund des geringen Ionisierungsgrades von wenigen Prozent im Bogen elastische Stöße mit Neutralteilchen überwiegen. Da Quecksilber leicht verdampft, lässt sich damit einerseits eine sehr hohe Neutralteilchendichte einstellen. Andererseits ist der Wirkungsquerschnitt für elastische Elektronenstreuung von Quecksilber im Vergleich zu vielen anderen Elementen sehr hoch. Beispielsweise liegt dieser Wert um einen Faktor 50 über dem Wert des Edelgases Xenon. Beide Eigenschaften zusammen ermöglichen eine geringe elektrische Leitfähigkeit und somit eine hohe elektrische Leistungsdichte im Lichtbogen.

Aus demselben Grund wird Quecksilber auch in Metallhalogenidlampen verwendet. Im Unterschied zu reinen Quecksilberbögen strahlen bei diesem Entladungstyp Metallhalogenidzusätze, z. B. NaI, oder Seltenerd-Halogenide, z. B. DyI_3 , HoI_3 oder TmI_3 . Die in Autoscheinwerfern verwendeten Xenon-Lampen beinhalten neben dem Startgas Xenon eine Mischung aus NaI und ScI_3 , die der Entladung ihre charakteristische Farbe verleihen. Die elektrischen Parameter, d. h. die

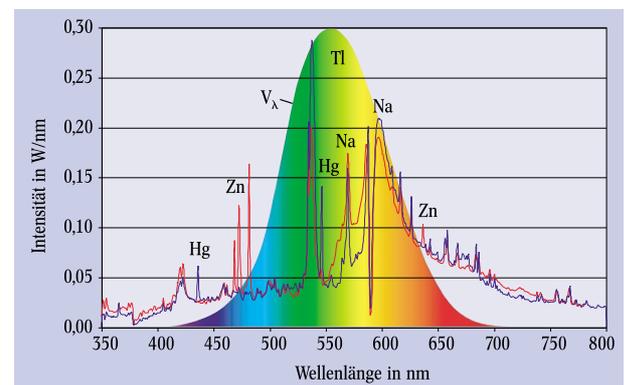


Abb. 4: Vergleich zweier Spektren von Metallhalogenidentladungen in NaI/TlI/DyI₃ bei einer Leistung von 75 W, einmal mit Hg (blaue Kurve) als Puffergas, das andere Mal mit Zn (rote Kurve). Wandmaterial ist in beiden Fällen polykristallines Al_2O_3 . Startgas ist Argon. Etwa 60 % der elektrischen Leistung werden in Strahlung konvertiert, rund die Hälfte davon im sichtbaren Spektralbereich. Dies entspricht Lichtausbeuten von 100 lm/W bei Hg bzw. 92 lm/W bei Zn. (Die farbige Kurve gibt die spektrale Augenempfindlichkeit wieder.)

Einstellung hinreichend hoher Leistungsdichten und Brennspannungen werden auch hier durch den vergleichsweise hohen Quecksilber-Partialdruck bestimmt.

In diesem Zusammenhang greifen bereits in diesem Jahr gesetzliche Regelungen der Europäischen Union hinsichtlich der Vermeidung von Quecksilber im Automobilbereich [8]. In den USA, z. B. den Bundesstaaten Vermont und Maine, gibt es inzwischen ähnliche Vorschriften, die eine Kennzeichnung quecksilberhaltiger Produkte sowie deren Entsorgung verlangen. Hinzu kommt der stärker werdende Druck von verschiedenen Industriezweigen, die umweltfreundlichere Produkte fordern: Neben eingesparten Recycling- und Entsorgungskosten spielt dabei auch das grüne Image von Unternehmen eine Rolle.

Energieeffiziente und quecksilberfreie Entladungslampen werden derzeit auch durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Bereich „Optische Technologien“ gefördert. Ein vielversprechender Ersatzkandidat für Quecksilber ist beispielsweise Zink [9]. Aufgrund des vergleichsweise hohen Siedepunktes lässt sich ein ausreichender Partialdruck aber erst bei Wandtemperaturen oberhalb von 1400 K erreichen. Dies erfordert keramische Wandmaterialien wie polykristallines Al_2O_3 . Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Spektren von Hochdruck-Gasentladungen in NaI/TlI und DyI_3 . Als Puffergas kommt Quecksilber oder Zink zum Einsatz. Die elektrischen Eigenschaften der Entladungen sind identisch. Im sichtbaren Spektralbereich beträgt die Lichtausbeute der quecksilberfreien Entladung etwa 92% der quecksilberhaltigen Lampe, bei nahezu identischen Spektren.

Diese Situation lässt sich beispielsweise durch eine höhere elektrische Leistungsdichte weiter verbessern. Neben den physikalischen Aspekten spielen auch chemische Reaktionen des Quecksilberersatzes mit der Lampenfüllung, der Gefäßwand und den Elektroden für die Lebensdauer eine wichtige Rolle.

Entwicklung von LED-Lichtquellen

Obwohl Leuchtdioden schon seit den 60er Jahren kommerziell erhältlich sind, war ihre Verwendung bis vor rund zehn Jahren auf Anzeige- und Signaleinrichtungen beschränkt. Einerseits lieferten die bis dahin bekannten grünen, gelben und roten LEDs nur einen sehr geringen Lichtstrom von ca. 0,2–2 Lumen. Andererseits gelang es mit den bis dahin verwendeten Halbleitermaterialien AlGaAs und AlGaInP aufgrund der zu geringen Bandlücken von Arseniden und Phosphiden nicht, blaue oder tiefgrüne Lichtemission zu erhalten, was für die Erzeugung von weißem Licht notwendig ist.

Der entscheidende Durchbruch wurde 1994 durch die Entwicklung von effizienten und stabilen blauen InGaN -LEDs auf Saphirsubstrat erzielt [10]. Mithilfe nitridischer Halbleiter lassen sich LEDs mit einer Lichtemission zwischen 370 und 580 nm produzieren, wobei sich das Emissionsmaximum mit steigendem In-Gehalt ins Langwellige verschiebt. Die höchste externe Quanteneffizienz von 20 % wurde bis jetzt für InGaN -LEDs bei einer Wellenlänge von 450 nm erreicht [11].

Etwa zur gleichen Zeit wurde die Entwicklung von so genannten „High Brightness“-LEDs vorangetrieben, welche die klassischen 5 mm großen Epoxydharz-LEDs in Lichtausbeute und -strom deutlich übertreffen [11]. Dazu wurde ein LED-Design entwickelt, das einen guten thermischen Kontakt zwischen LED-Kristall und

Halterung gewährleistet, sodass eine optimale Kühlung des Halbleiters erzielt wird. Zudem wurde die Chipfläche von 0,07 auf 1 mm² deutlich erhöht, sodass inzwischen LEDs mit einer Leistungsaufnahme von bis zu einigen Watt produziert werden.

Weißer LEDs für Beleuchtungszwecke lassen sich heute auf der Grundlage von InGaN -Halbleitern konstruieren, die im UV-A- oder blauen Spektralbereich emittieren. Dazu wird der quadratische Chip, der sich in einem Reflektor befindet, mit einem geeigneten Leuchtstoff beschichtet. Das resultierende Spektrum entspricht weißem Licht mit hohem Lumenäquivalent und hoher Farbwiedergabe. Hierzu bieten sich zwei Konzepte an: erstens die Beschichtung von UV-A-LEDs mit einem Leuchtstoff, der das UV-A-Licht vollständig in weißes Licht konvertiert, zweitens die Beschichtung von blauen LEDs mit einem Leuchtstoff,

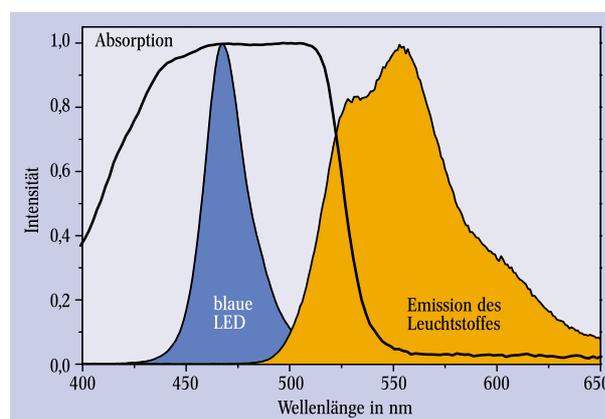


Abb. 5: Prinzip der Lichtkonversion in einer weißen Leuchtstoff-LED. Die blaue Emissionsbande entspricht der Lichtemission eines üblichen InGaN -Halbleiterchips. Die schwarze Kurve zeigt das Absorptionsverhalten des gelb-emittierenden Leuchtstoffes.

der gelbes Licht emittiert. In diesem Fall muss die Schichtdicke derart eingestellt werden, dass ein bestimmter Anteil des blauen Lichts nicht in gelbes Licht konvertiert wird und durch additive Lichtmischung weißes Licht entsteht.

Die externe Energieeffizienz einer Leuchtstoff-LED hängt dann neben der Chipeffizienz η_{chip} und der Lichtauskopplungseffizienz η_{esc} auch noch von der Konversionseffizienz der Leuchtstoffschicht η_{conv} , dem Energieabstand zwischen absorbierten und emittierten Photonen, dem sog. Stokes Shift $SS (E_{\text{abs}} - E_{\text{em}}, E$: Photonenenergie), und der internen Quantenausbeute des Leuchtstoffes η_{hv} ab:

$$\eta_{\text{LED}} = \eta_{\text{chip}} \times \eta_{\text{conv}} \times \eta_{\text{hv}} \times 1/SS$$

Unter den Annahmen einer Quantenausbeute von 95 % und einer Konversionseffizienz von 60 % erhält man für weiße LEDs eine externe Energieeffizienz von 27 %, wenn die interne Quantenausbeute und Auskopplungseffizienz der InGaN -Chips der von AlGaInP -Chips (s. o.) entspräche. Dieser Wert gilt bei der Verwendung von 460-nm-LEDs.

Bei der Verwendung von 370-nm-LEDs reduziert sich die maximale Quantenausbeute auf rund 23 % aufgrund des größeren Stokes-Shifts. Da bis heute die blauen InGaN -LEDs zudem auch höhere Quanteneffizienzen als UV-LEDs zeigen, wurden konsequenterweise 1997 weiße LEDs entwickelt, die auf blau-emittierenden LED-Chips basieren. Die weiße Emission

wird durch eine Beschichtung mit dem Leuchtstoff $(Y,Gd)_3(Al,Ga)_5O_{12} \cdot Ce$ (YAG:Ce) erreicht, der blaue Strahlung stark absorbiert und bei etwa 560 nm breitbandig emittiert (Abb. 5).

Als Resultat erhält man eine weiße Lichtquelle, die bei einer Farbtemperatur von 5000 K eine hohe Farbwiedergabe erreicht. Erste Exemplare hatten allerdings nur eine geringe Lichtausbeute von 10 lm/W. Bei einer Leistungsaufnahme von ca. 70 mW entspricht dies einem Lichtstrom von 0,7 lm [12]. Durch die stetige Verbesserung der Abscheidetechnologie zur Herstellung der Halbleiter sowie der Leuchtstoffbeschichtung liefern neuere weiße LEDs eine Lichtausbeute von 30 lm/W. Die Leistungsaufnahmen konnten bis auf 5 W gesteigert werden [12]. Somit lassen sich LEDs mit einem Lichtstrom von bis zu 150 lm realisieren, was bereits 10 % der Lichtmenge einer üblichen 100-W-Glühlampe entspricht.

Die Vorteile von LEDs gegenüber anderen Lichtquellen liegen in ihrer enormen Lebensdauer von mehreren 10 000 Stunden [13], ihrer hohen geometrischen Flexibilität und in ihrer einfachen Ansteuerung aufgrund des Niederspannungsbetriebs. Sie sind demnach durchaus mit Halogenlampen zu vergleichen, wobei diese in Lebensdauer und Effizienz übertreffen. Weitere Verbesserungen dieser Parameter sind abzusehen, sodass sie in einigen Jahren auch mit Energiesparlampen konkurrieren werden.

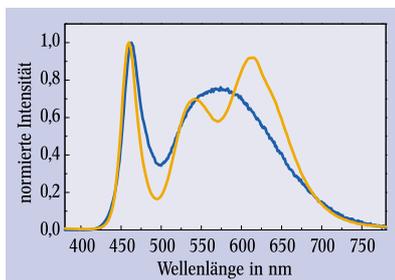


Abb. 6: Spektren von weißen LEDs auf der Basis eines 460-nm-InGaN-Chips mit YAG:Ce (blaue Kurve) bzw. $SrGa_2S_4:Eu$ und $SrS:Eu$ (orange Kurve).

Bevor LEDs in der Allgemeinbeleuchtung weiter verbreitet werden, müssen allerdings einige technische Probleme gelöst werden. Zum Beispiel hängt bei weißen LEDs, die YAG:Ce als Leuchtstoff verwenden, die Farbwiedergabe stark von der Farbtemperatur ab [14]. Diese Beobachtung lässt sich auf den fehlenden Rotanteil im Spektrum zurückführen. Ein weiteres Konzept, um LED-Lichtquellen mit einer hohen Farbwiedergabe zu erhalten, besteht in der Verwendung eines grünen und eines roten Leuchtstoffs. Mithilfe der additiven Farbmischung dreier Farben erhält man weißes Licht mit hoher Farbwiedergabe unabhängig von der Farbtemperatur. Dieses Konzept findet seit den 70er Jahren in den Dreibandlampen, wie z. B. Energiesparlampen und Leuchtstoffröhren, breite Anwendung. Geeignete grüne und rote Leuchtstoffe müssen ihr Emissionsmaximum zwischen 520 und 560 nm bzw. 590 und 630 nm aufweisen. Hocheffiziente Leuchtstoffe, die dieses Kriterium erfüllen und auch stark im blauen Spektralbereich um 450 nm absorbieren, waren mit $SrGa_2S_4:Eu$ (535 nm) und $SrS:Eu$ (615 nm) schnell gefunden [14]. Mit dieser Leuchtstoffkombination lassen sich weiße LEDs mit einer sehr hohen Farbwiedergabe für alle Farbtemperaturen zwischen 2700 und 8000 K realisieren (Abb. 6).

Weiterhin wird daran gearbeitet, die interne Quantenausbeute der InGaN-Chips und die Lichtauskopplung zu verbessern, um zu noch höheren Effizienzen zu

gelangen, die mit denen der besten roten AlGaInP-Chips vergleichbar sind. Gleichzeitig wird versucht, den Lichtstrom pro LED durch eine Vergrößerung der Chipfläche zu steigern.

Der Preis der weißen LEDs muss noch stark fallen, um als Massenprodukt am Markt erfolgreich zu sein. Ein typischer Indikator für Lichtquellen ist der Preis, den man für ein Lumen Licht bezahlt. Während dieser für Glühlampen nur 0,1 Cent/lm (100-W-Glühlampe) beträgt, liegt er bei weißen LEDs noch bei etwa 10 Cent/lm. Es wird erwartet, dass dieser Wert bis spätestens 2010 auf 1 Cent/lm fällt [15]. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit und Flexibilität von LED-Lichtquellen werden spätestens dann weiße LEDs nicht nur für Glüh- und Halogenlampen, sondern auch für Energiesparlampen zur interessanten Alternative.

Zukunftsperspektiven

Quecksilberfreie und hocheffiziente Lichtquellen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Anhand umweltpolitischer und technologischer Entwicklungen zeichnen sich folgende Trends bereits heute ab: Die Reduktion bzw. Vermeidung von Quecksilber in Niederdruck- und Hochdruckentladungen wird weiter vorangetrieben. Neben der konventionellen Hg-Niederdruckentladung werden neuartige Möglichkeiten zur Strahlungserzeugung untersucht, z. B. Niederdruck-Molekülentladungen, in denen direkt sichtbares Licht emittiert wird. Auf diese Weise könnte der Energieeffizienzverlust durch den Stokes-Shift vermieden werden. Alternativ könnten hier auch Leuchtstoffe mit einer Quantenausbeute von mehr als 100 % – so genannte Quantencutter – zum Einsatz kommen. Derartige Leuchtstoffe emittieren nach der Absorption eines UV-Photons zwei sichtbare Photonen. Demnach kann die Quantenausbeute bis zu 200 % betragen. Man käme dann dem theoretischen Lichtausbeutelimit von ca. 300 lm/W für weißes Licht beträchtlich näher. In Hochdrucklampen kommt es – neben einem vollständigen Ersatzes des Quecksilbers – im Wesentlichen auf eine Verringerung der Infrarotstrahlungsverluste an. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die seit einiger Zeit untersuchte Hg-freie Schwefelentladung. Hier spielt insbesondere die Weiterentwicklung von Systemkomponenten wie Mikrowellengenerator, Füllsubstanzen und Wandmaterial eine zentrale Rolle. In Lichtquellen mit Elektroden müssen außerdem Elektrodenverluste weiter verringert werden.

Durch die Entwicklung blauer LEDs besteht nun erstmals die Möglichkeit, weiße Festkörper-Lichtquellen mit einer Lichtausbeute von mehr als 100 lm/W zu realisieren. Dies hätte erhebliche Auswirkungen auf den Markt für Glüh-, Halogen- und Energiesparlampen. Die weiteren Vorteile von LEDs hinsichtlich Lebensdauer, Ansteuerung und geometrischer und lichttechnischer Flexibilität werden diese Entwicklung zusätzlich beschleunigen. Über anorganische LEDs hinaus lässt auch die jüngste Entwicklung von organischen LEDs (OLEDs oder Polymer-LEDs, PLEDs) den Einsatz als umweltfreundliche und effiziente Lichtquellen erwarten.

Literatur

- [1] *J. G. Fleming et al.*, Nature **417**, 52 (2002)
- [2] *M. Krames et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 2365 (1999)
- [3] European Lighting Companies Federation, Discharge Lamps and the Environment, 4th Edition, Brüssel (1997)
- [4] *M. Oomen*, Proc. of the 8th Int. Symp. on the Sci. & Techn. of Light Sources, Greifswald, 1998, S. 24
- [5] *B. J. Mulder, S. van Heusden*, J. Electrochem. Soc. **130**, 4405 (1983)
- [6] *H. Ito et al.*, Proc. of the 8th Int. Symp. on the Sci. & Techn. of Light Sources, Budapest, 1992
- [7] *G. Derra, E. Fischer, H. Mönch*, Phys. Bl., September 1998, S. 817
- [8] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge: www.umwelt-online.de/recht/abfall/00_53gs.htm und www.umwelt-online.de/recht/z_pdf/eu/2000_53.pdf
- [9] *M. Born*, Untersuchungen zum Ersatz des Quecksilbers in keramischen Hochdruckgasentladungen mit metallischem Zink, Mainz (2000)
- [10] *S. Nakamura, T. Mukai*, Appl. Phys. Lett. **64**, 1687 (1994)
- [11] *J. J. Wierer et al.*, Appl. Phys. Lett. **78**, 3379 (2001)
- [12] *K. Bando*, Symp. Proc. Of the 8th Int. Symp. on the Sci. & Tech. of Light Sources, 1998, S. 80
- [13] *K. Scott*, The Lighting Journal, Mai/Juni 2002, S. 34
- [14] *R. Mueller-Mach, G. O. Mueller*, Proc. of the SPIE **3938**, 30 (2000)
- [15] *R. Haitz*, Proc. of the 9th Int. Symp. on the Sci. & Techn. of Light Sources, Ithaca, NY, 2001, S. 319

Die Autoren

Matthias Born, Jahrgang 1963, studierte Physik in Düsseldorf. Schwerpunkte seiner Diplom- und Doktorarbeit (1992) am dortigen Institut für Laser- und Plasma-physik lagen auf dem Gebiet der Plasma-diagnostik am Tokamak UNITOR. Seit 1992 arbeitet er bei Philips in Aachen als Senior Scientist in der Forschungsgruppe „Lichterzeugung“. Im Jahr 2000 habilitierte sich Born mit Arbeiten über quecksilberfreie Gasentladungslampen an der Uni Düsseldorf, wo er von 1997 bis 2000 als Lehrbeauftragter tätig war. Seit Mitte 2000 ist Born Privatdozent an der Uni Düsseldorf. **Thomas Jüstel**, Jahrgang 1968, studierte an der Uni Bochum Chemie. An gleicher Stelle fertigte er seine Doktorarbeit mit einem koordinationschemischen Thema an (1994). Nach einem kurzen Aufenthalt als Postdoktorand am MPI für Strahlenchemie in Mülheim hat Jüstel Mitte 1995 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Philips in Aachen aufgenommen. Als Senior Scientist arbeitet er dort in der Forschungsgruppe „Nanomaterials and Devices“. Aktuell forscht Jüstel an Leuchtstoffen für Flachbildschirme, LEDs und Gasentladungslampen.

