

Energiewende in neuem Licht

Der Augsburger Physiker Jörg Frischeisen entwickelte in seiner Doktorarbeit neuartige Verfahren, mit denen die Effizienz von organischen Leuchtdioden – potenziellen Energiesparlampen der Zukunft – deutlich gesteigert werden kann

In Zeiten der Energiewende ist es nicht nur wichtig, die erneuerbare Energieerzeugung auszubauen. Viel Potenzial liegt auch darin, mit den vorhandenen Ressourcen sparsamer umzugehen. Zurzeit wird rund ein Fünftel der weltweiten elektrischen Energie für Beleuchtung aufgewendet. Dies inspirierte Jörg Frischeisen, sich in seiner Doktorarbeit mit sparsamen Alternativen zu herkömmlichen Glüh- und Energiesparlampen zu befassen. Der Physiker untersuchte sogenannte organische Leuchtdioden (OLEDs). Bei seinen umfassenden Grundlagenstudien – die zu drei Patentanmeldungen führten – gelang es Frischeisen, neue Verfahren zu entwickeln, mit denen die Effizienz dieser ohnehin schon Strom sparenden Leuchtmittel noch einmal deutlich gesteigert werden kann.

Jahrtausendlang blieb unseren Ahnen nur das Feuer, um nächtliches Dunkel zu erhellen. Auch Kerzen und Öllampen operieren mit offener Flamme. Licht ohne Brandgefahr brachte die 1879 von Thomas A. Edison erfundene »Glühbirne«: Sie besteht aus einem luftleeren Glaskolben, in dem ein elektrischer Leiter durch Strom zur Weißglut erhitzt wird. Edison nutzte als Leiter anfangs Kohlefäden. Doch mit denen hielten die Lampen nur 15 Stunden. Später wurden Wolframfäden verwendet, was die Lebensdauer auf rund 1000 Stunden erhöhte.

Im Prinzip sind aber auch Glühlampen – wie Feuer – »thermische Strahler«: Der elektrische Strom erzeugt in ihnen vor allem Wärme und nur als eine Art Nebenprodukt Licht. Das

Studienpreis-Juror Christian Schwägerl:

»In der hitzigen und zum Teil hämischen Debatte über das EU-Glühlampen-Verbot konnte der Eindruck entstehen, dass das Energieeinsparpotenzial in diesem Bereich zu vernachlässigen ist. Tatsächlich wird weltweit aber rund ein Fünftel der elektrischen Energie für Beleuchtung verwendet. Deshalb ist es wichtig, die Lichtqualität und vor allem die Ökobilanz von energiesparenden Lampen zu optimieren. Jörg Frischeisen hat sich in seiner Forschung mit einer der jüngsten vielversprechenden Alternativen zu herkömmlichen Leuchtmitteln befasst: den sogenannten organischen Leuchtdioden, kurz OLEDs. Ihm ist es gelungen, kostengünstige Verfahren zu entwickeln, die die Lichtausbeute von OLEDs um bis zu 70 Prozent steigern – ein entscheidender Schritt für ihre Marktfähigkeit.«

macht sie ineffizient. Selbst heutige Glühlampen wandeln nur rund fünf Prozent der aufgenommenen elektrischen Energie in Licht um (deshalb werden sie auch so heiß).

Bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts gibt es mit Leuchtstofflampen eine Energie sparende Alternative: Sie erzeugen bei gleichem Energieverbrauch rund fünf Mal mehr nutzbares Licht und halten bis zu 15.000 Stunden (sinkt bei häufigem Ein- und Ausschalten). Die Röhren enthalten meist Quecksilberdampf, der nach Anlegen einer elektrischen Spannung ultraviolette Strahlung aussendet. Eine Beschichtung auf der Innenwand der Röhre wandelt die ultraviolette Strahlung in sichtbares weißes Licht um.

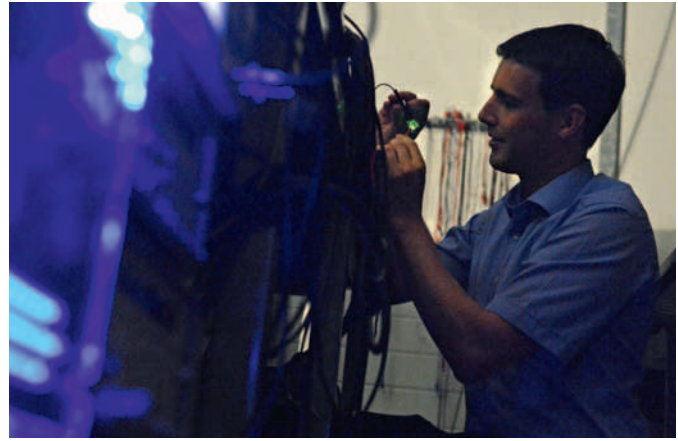
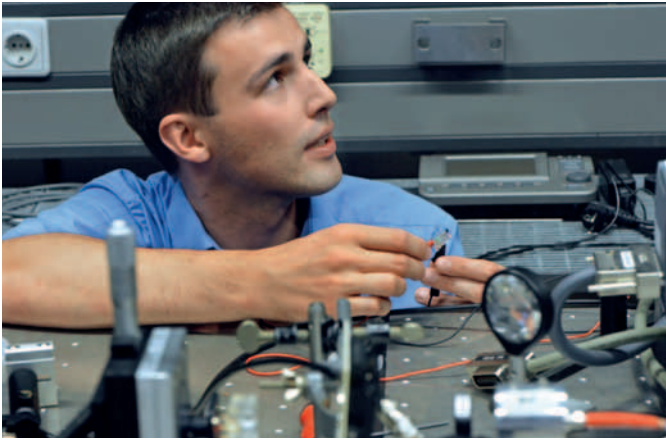
Auch heutige Energiesparlampen basieren auf diesem Prinzip. Sie sind nichts anderes als miniaturisierte Leuchtstofflampen. Den Vorteilen des niedrigen Energieverbrauchs steht ein zuweilen als unangenehm empfundenenes Licht entgegen. Im Gegensatz zu weißem Tageslicht, das sämtliche sichtbaren Lichtfrequenzen in kontinuierlicher Verteilung enthält, weist das von Leuchtstofflampen abgestrahlte Licht eine Reihe von materialabhängigen »Peaks« (Spitzen) auf und wirkt dadurch weniger harmonisch. Ein weiteres Problem von Leuchtstofflampen ist das darin enthaltene hochgiftige Quecksilber.

Eine moderne Alternative zu Glühlampen sowie herkömmlichen Leuchtstoff- und Energiesparlampen sind LED-Lichtquellen. Solche »Leuchtdioden« (das Kürzel LED steht für Licht emittierende Diode) bestehen aus anorganischen Halbleitermaterialien wie Galliumnitrid und arbeiten nach dem Prinzip der Elektrolumineszenz: Wird an einen Festkörper (beispielsweise ein Halbleiter-Kristall) eine elektrische Spannung angelegt, kann dieser dazu angeregt werden, elektromagnetische Strahlung – unter anderem in Form von sichtbarem Licht – auszusenden.

Erste LED-Prototypen gab es bereits Anfang der 1960er Jahre. In den Folgejahren zogen Leuchtdioden als rote oder gelbe Statusanzeigen in Elektronikgeräte und Tastaturen ein. Später kamen grüne, blaue und Mitte der 1990er Jahre auch weiße LEDs hinzu.

Auch zur Wohnraum-Beleuchtung werden immer häufiger LEDs eingesetzt. Seit einigen Jahren gibt es LED-Lampen in der Form herkömmlicher Glühlampen, die in vorhandene Schraubsockel passen. Die Preise sind mit aktuell ab rund 10 Euro aller-





dings deutlich höher als die von Energiesparlampen. Die Lebensdauer von LED-Lampen liegt bei 15.000 bis 50.000 Stunden. Sie halten daher im Schnitt 35 Mal länger als Glühlampen und doppelt so lange wie Energiesparlampen. Auch leiden sie weniger unter häufigem Ein- und Ausschalten. Die Langlebigkeit von LED-Lampen macht sich vor allem in großen Fabrikhallen und Tunnels bezahlt, wo der Austausch defekter Lampen sehr aufwendig und teuer ist. Die Energieeffizienz heutiger LED-Lampen ist ähnlich hoch wie die von Energiesparlampen: Man braucht jeweils ein 8-Watt-Exemplar, um in etwa die Leuchtkraft einer herkömmlichen 40-Watt-Glühlampe zu erreichen.

Grundlagenforscher im LED-Sektor haben sich in den letzten Jahren zunehmend mit einem neuartigen LED-Typ befasst, der statt aus anorganischen Halbleitern aus organischen Materialien aufgebaut ist. Solche OLEDs (organische Leuchtdioden) hat auch Jörg Frischeisen in seiner Doktorarbeit untersucht. »OLEDs werden aus Molekülen oder Polymeren auf Kohlenstoffbasis hergestellt«, erklärt der Physiker. »Sie sind im Gegensatz zu LEDs keine Punktlichtquellen, sondern großflächige dünne Lichtquellen, die ein angenehm diffuses Licht ähnlich dem natürlichen Tageslicht abstrahlen. Außerdem ist die Farben- und Formenvielfalt von OLEDs nahezu unbegrenzt.«

Bei der Herstellung von OLEDs werden die organischen Materialien meist auf ein Glassubstrat aufgedampft. »Die Schichten befinden sich zwischen zwei großflächigen Elektroden«, sagt Frischeisen. »Eine der Elektroden besteht in der Regel aus einem durchsichtigen, leitfähigen Material. Durch diese Elektrode tritt das erzeugte Licht aus. Die andere Elektrode besteht meist aus einer Aluminium- oder Silberschicht, die als Reflektor an der Rückseite dient.«

Die organischen Schichten in OLEDs sind rund hundert Mal dünner als ein menschliches Haar. Sie lassen sich auch nahezu transparent herstellen. In dieser Variante eignen sie sich beispielsweise für OLED-Fenster, die tagsüber das Tageslicht durchlassen, während sie nachts, sofern eingeschaltet, über ihre gesamte Fläche Licht abstrahlen. Künftig sind sogar OLED-Displays auf Folien zum Aufrollen denkbar.

Den vielen Vorteilen der OLEDs stehen aber auch einige Nachteile gegenüber. OLEDs sind, trotz vieler Verbesserungen in den letzten Jahren, noch nicht sehr effizient, weil ein erheblicher Teil des erzeugten Lichts gleichsam in den dünnen orga-

nischen Schichten »gefangen« bleibt und damit nicht nach außen dringen kann. Im Fachjargon nennt sich das »stark limitierte Lichtauskopplung«.

Frischeisens Doktorarbeit widmet sich Verfahren, mit denen diese Lichtauskopplung verbessert werden kann. Ein Teil der Verluste geht darauf zurück, dass das Licht am Übergang vom Glas zur Luft stark reflektiert wird, wenn es in einem Winkel von über 42 Grad auftrifft. »Der reflektierte Anteil bleibt im Bauteil gefangen und wird als *Substratmode* bezeichnet«, erklärt der Preisträger. Dieser Effekt lässt sich jedoch relativ einfach durch Aufrauen oder eine spezielle Strukturierung der Glasoberfläche beseitigen.

Weit hinderlicher sind zwei weitere Störeffekte: *Wellenleitermoden* entstehen, wenn das in den organischen Schichten erzeugte Licht unter einem großen Winkel abgestrahlt wird. Infolgedessen wird es am Übergang zwischen den organischen Schichten und dem Glas vollständig reflektiert. Es läuft in dieser Zone so lange hin und her, bis es irgendwo absorbiert wird. Dies mindert die Lichtabstrahlung und damit die Energieeffizienz. Das zweite Störphänomen sind sogenannte *Oberflächenplasmonen* – elektromagnetische Oberflächenwellen, die, so Frischeisen, »am ehesten mit Wasserwellen auf einem Teich verglichen werden können«. In diese Wellen fließt ebenfalls ein Teil der Energie ab. In der Summe führen diese Störfaktoren dazu, dass typischerweise nur etwa 40 Prozent des in OLEDs erzeugten Lichtes nach außen dringt.

Frischeisen hat in seiner Doktorarbeit jedoch Methoden entwickelt, mit denen die Lichtausbeute um bis zu 70 Prozent gesteigert werden kann. Eine dieser Methoden basiert auf Streuung an periodischen Strukturen. Der Physiker vergleicht dies mit einem Auto, das über eine Reihe von Bodenwellen fährt und dabei aufgeschaukelt wird. Diese Aufschaukelung erfolgt senkrecht zur Fahrtrichtung. In ähnlicher Weise kann die Energie von Wellenleitermoden und Oberflächenplasmonen, die sich entlang der Schichtebene ausbreiten, so umgelenkt werden, dass die Strahlung nach oben und damit nach außen dringt. In seinen Experimenten nutzte Frischeisen als »Stolpersteine« für die Wellen die Spuren einer DVD, die einen Abstand von 740 Nanometern haben. DVDs lassen sich heute für wenige Cent herstellen. Entsprechend kostengünstig sollten sich solche streuenden Mikrostrukturen in OLED-Schichten realisieren lassen – etwa mit Hilfe eines Stempelverfahrens (»Na-

noimprint«). Weiterhin lassen sich die Verluste dadurch mindern, dass auf die Oberfläche der OLED eine dünne Schicht mit hohem optischen Brechungsindex aufgetragen wird. Diese »Hochindexkopplung« hat sich Frischeisen bereits patentieren lassen.

Die Energieeffizienz lässt sich aber nicht nur durch Rückgewinnung von Verlusten erhöhen. Noch besser ist es, diese Verluste gar nicht erst entstehen zu lassen. Schon länger wissen Forscher, dass manche der Licht erzeugenden Polymermaterialien in OLEDs eine sehr gute Auskopplung aufweisen. Grund: Die langen Polymere lagern sich auf dem Glassubstrat größtenteils flach an – ähnlich wie Spaghetti auf einem Teller. Dadurch senden sie das Licht vorzugsweise senkrecht zur Ebene aus. »Man kann die langen Polymere mit Sendemasten vergleichen«, erklärt der Preisträger. »Sendemasten werden deshalb senkrecht aufgestellt, weil sie dann die höchste Reichweite haben. Sie sänke deutlich, wenn man den Sendemast flach auf die Erde legte, weil dann die Strahlungsenergie vorzugsweise in Richtung Boden und nach oben abgestrahlt würde. Bei den langen Polymeren aber ist genau dieser Effekt vorteilhaft. Nach oben abgestrahltes Licht läuft weniger Gefahr, sich in den horizontalen Schichten der OLED zu verlieren.«

OLEDs können auf zweierlei Weise hergestellt werden: aus längeren Polymeren, die mittels Drucken oder »Spin-Coating« (Beschichtungsverfahren) auf das Substrat aufgebracht werden, oder durch kleinere organische Moleküle, die aufgedampft werden. Frischeisen konnte in seiner Doktorarbeit erstmals

nachweisen, dass auch die kleineren aufgedampften Moleküle eine Vorzugsrichtung relativ zum Untergrund aufweisen und dadurch bei bestimmter Orientierung mehr nutzbares Licht abstrahlen. Außerdem entwickelte er eine neuartige Messmethode, mit der sich der Grad der Molekül-Orientierung bestimmen lässt. Damit erhalten Forscher und Ingenieure ein weiteres wichtiges Instrument an die Hand, um die Effizienz von OLEDs zu steigern. »Der Clou dabei ist«, sagt Frischeisen, »dass die Orientierung eine inhärente Eigenschaft des verwendeten Materials ist und die verbesserte Lichtauskopplung so ohne zusätzliche Kosten erreicht werden kann.«

Jörg Frischeisen studierte von 2000 bis 2006 Physik an der Universität Regensburg und der University of Colorado, Boulder, USA. Anschließend promovierte er am Lehrstuhl für Experimentalphysik IV der Universität Augsburg in der Arbeitsgruppe »Organische Halbleiter« und war als wissenschaftlicher Mitarbeiter in zwei vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekten zur organischen Phosphoreszenz tätig. Seine Promotion absolvierte er im Rahmen des Internationalen Graduiertenkollegs »Materials Science of Complex Interfaces« (Complnt) des Elitenetzwerks Bayern. Seit Abschluss der Promotion im Januar 2011 ist er in der Abteilung für Leuchtstoff-Entwicklung der OSRAM AG tätig.

Beitragstitel **Es werde Licht – mehr Licht!**

Jörg Frischeisen

Promotion an der Universität Augsburg

OSRAM AG

Mobil +49 · 163 · 690 63 63

E-Mail joerg.frischeisen@gmx.de

