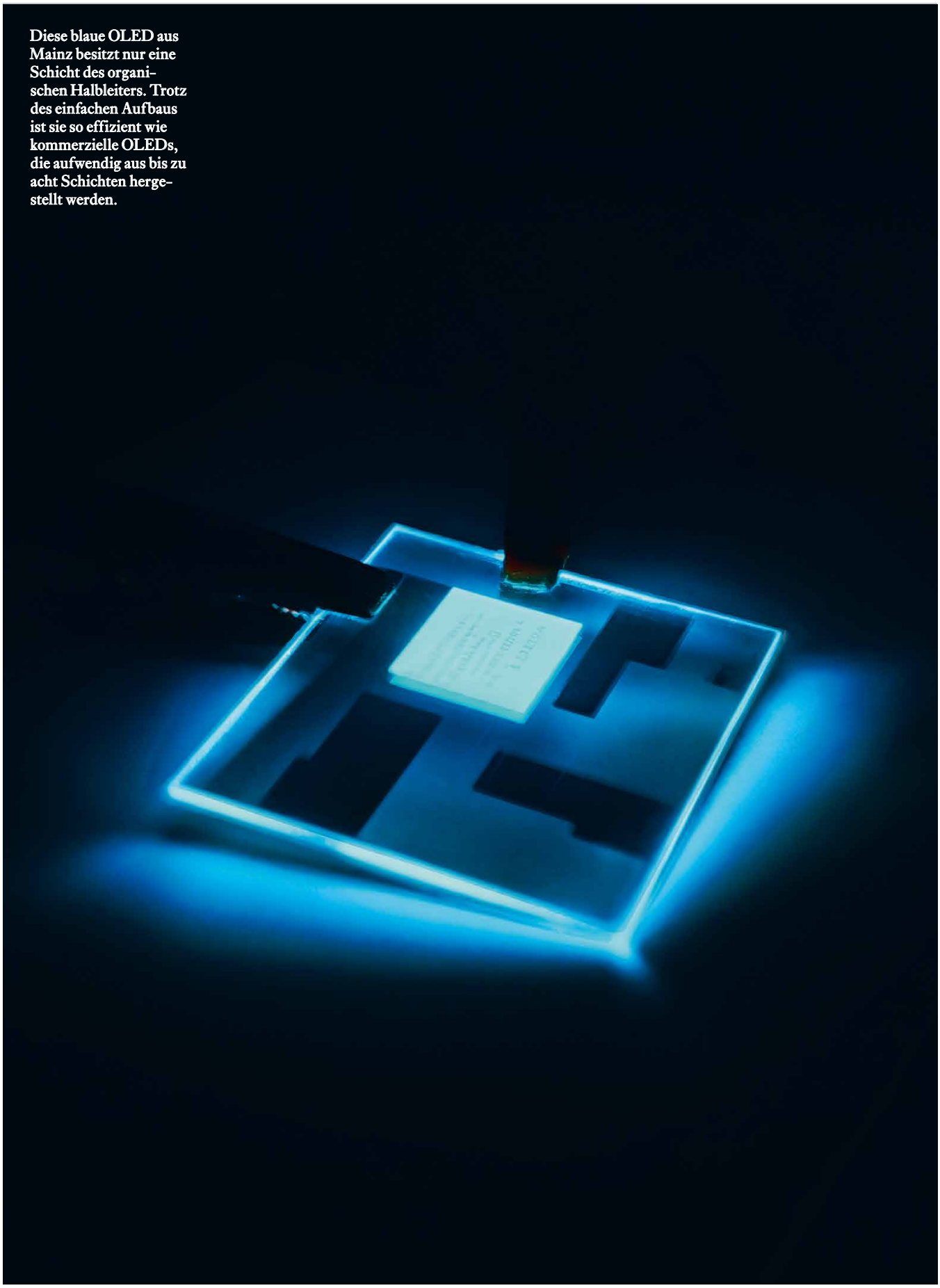


Diese blaue OLED aus Mainz besitzt nur eine Schicht des organischen Halbleiters. Trotz des einfachen Aufbaus ist sie so effizient wie kommerzielle OLEDs, die aufwendig aus bis zu acht Schichten hergestellt werden.

FOTO: MPI FÜR POLYMERFORSCHUNG

LEUCHTEND BLAU

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Satte Farben, extrem scharfe Bilder, niedriger Energieverbrauch: Organische Leuchtdioden haben in mobilen und hochwertigen TV-Geräten neue Standards gesetzt. Doch die Technik ist noch nicht perfekt. Probleme bereiten vor allem die blau leuchtenden OLEDs. An ihrer Verbesserung forscht ein Team um Paul Blom, Direktor am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz, und um den Gruppenleiter Gert-Jan Wetzelaer. Ihr Ziel: hocheffiziente, druckbare OLEDs.

Blau ist nicht gleich blau in der Welt der Displays – das zeigt ein Vergleich der TV-Geräte in einem Elektronikladen: die Blautöne variieren von flau bis intensiv, je nach Preisklasse. Besonders hochwertig sind Bildschirme aus organischen Leuchtdioden, kurz OLEDs. „Im Gegensatz zu den Flüssigkristall-Displays bieten sie auch besonders tiefe Schwarzwerte“, erklärt Gert-Jan Wetzelaer, Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Das liegt am Funktionsprinzip. Während Flüssigkristall-Displays, kurz LCDs, ein Bild erzeugen, indem sie in jedem farbigen Bildpixel eine Hintergrundbeleuchtung mehr oder weniger stark abdimmen, leuchten OLED-Pixel selbst, und ihre Helligkeit lässt sich regeln. Das ermöglicht ein Tiefschwarz durch simples Abschalten. LCDs haben zudem den prinzipiellen Nachteil, dass sich nur die Hälfte des Lichts der Hintergrundbeleuchtung für die Helligkeitssteuerung mit Flüssigkristallen eignet, der Rest muss herausgefiltert werden – das treibt den Energieverbrauch hoch.

„Deshalb haben sich OLEDs zuerst bei Mobilgeräten durchgesetzt“, sagt Paul Blom, Direktor am Institut, „denn sie sparen Energie und verlängern die Akkulaufzeit.“ Beim Fernseher kommt es dagegen eher auf überzeugende Farben und gute Kontraste an, aber auch hier punkten OLEDs. Allerdings konnte diese Technik ein Versprechen aus der euphorischen Phase der frühen 1990er-Jahre nicht einlösen: billig und sogar per Tintenstrahldrucker auf verschiedene Untergründe druckbar zu sein. Im Gegenteil, die heute etablierte OLED-Herstellung ist ähnlich aufwendig wie die Herstellung von Computerchips. Das verteuert insbesondere große OLED-Displays für TV-Geräte. Die größten Probleme bereiten dabei die blauen OLED-Bildpixel. Sie sind ein wichtiger Grund, warum der Physiker Blom, der früher bei Philips an OLEDs geforscht hat, 2012 als frisch berufener Direktor die OLED-Forschung in die Max-Planck-Gesellschaft eingebracht hat. Denn OLEDs erfordern seiner Ansicht nach bis heute echte Grundlagenforschung.

Warum das so ist, wird nachvollziehbar, wenn man sich die Funktionsweise von OLEDs anschaut. In ihrem Namen steckt bereits, dass sie aus einem organischen, also kohlenstoffbasierten Material bestehen, das wie Silizium ein Halbleiter sein muss. Sie wandeln Strom in Licht um. Wie das geschieht, veranschaulicht Blom mit einem Bild: „Stellen Sie sich ein Schwimmbad vor, in dem das Becken voller Menschen ist.“ Bademeister, bitte wegschauen: Auch das Becken am Sprungturm stelle man sich dicht gepackt vor. Jeder Schwimmer repräsentiert dabei ein Elektron. Nun steigt einer dieser Elektronenvertreter aus dem Becken, hinterlässt zwischen den eng Schwimmenden also eine Lücke – in der Physik spricht man von einem Loch – und →

klettert auf eines der Sprungbretter. „Die Kletterhöhe entspricht der zugeführten elektrischen Energie, zum Beispiel aus dem Akku“, sagt Blom. Dann springt der Mensch genau in das Loch hinein, das er hinterlassen hat. Die Wellen beim Eintauchen können wir uns als Photon vorstellen, das die frei gewordene Energie fortträgt.

Schädliche Energie

Mit der Sprunghöhe steigt die Energie beim Aufprall – bei springenden Elektronen entspricht das der Energie des frei werdenden Lichts: Rotes Licht würde im Badebild ungefähr einem Sprung vom Ein-Meter-Brett entsprechen, grünes dem vom Drei-Meter-Brett und blaues dem vom Zehn-Meter-Turm. Bei dieser größten Sprunghöhe kann man sich vorstellen, dass der Einschlag große Schäden unter den Schwimmern verursachen kann, wenn er nicht genau ins Loch geht. So werden die Moleküle des organischen Halbleiters von der hohen Energie, die blaues Licht erfordert, leicht zerstört. Deshalb muss diese Energie möglichst effizient in Licht kanalisiert werden.

Wetzelaer, ebenfalls Physiker, erklärt den Aufbau einer OLED: „Im einfachsten Fall ist sie ein Sandwich aus zwei Elektroden, zwischen denen eine nur 80 Nanometer – das sind Millionstel Millimeter – dicke Schicht des organischen Halbleiters eingeschlossen ist.“ Eine der beiden Elektroden injiziert nun gewissermaßen Elektronen in das Material, die Gegenelektrode erzeugt darin Ladungslöcher, indem sie Elektronen absaugt. Bei einem Loch fehlt ein negativ geladenes Elektron in den Bindungen zwischen den Atomen. Es stellt also effektiv einen positiven Ladungsträger dar, der sogar durch den Halbleiter wandern kann. Die Elektronen und Löcher laufen in der Halbleiterschicht aufeinander zu, bis sie sich treffen. Im Idealfall fällt dann je ein Elektron in ein Loch. Dabei setzt es die Energie, die es von der Elektrode mitbekam, abhängig vom Halbleitermaterial als rotes, grünes oder blaues Photon frei. Damit das Licht die OLED verlassen kann, ist eine der beiden Elektroden transparent.

FOTO: ROLAND WENGENMAYR

Doktorandin Chongyao Li beschichtet in einer Handschuh-Box unter reiner Stickstoffatmosphäre Elektroden mit verschiedenen Testmaterialien für OLEDs.

So weit der Idealfall. „Die Realität ist allerdings komplizierter“, erläutert Blom. Denn bevor ein Elektron und ein Loch Hochzeit feiern, verloben sie sich gewissermaßen. Sie bilden ein sogenanntes Exziton, das als Paar, noch ohne sich vereinigt zu haben, durch die OLED bis zum Hochzeitsplatz wandert. Doch nur ein Viertel der Exzitonen setzt bei ihrer Vereinigung ein Photon frei. In drei Viertel der Fälle wird die Energie an das Material abgegeben und schädigt es. Daher werden in roten und grünen OLEDs die Edelmetalle Iridium oder Platin in den organischen Halbleiter eingebaut. Sie wirken als Heiratsvermittler für die leuchtende Hochzeit der Exzitonen. Allerdings sind diese Edelmetalle teuer, weshalb die Mainzer nach kohlenstoffbasiertem Ersatz suchen. Bislang haben sie jedoch noch keine praxistaugliche Alternative gefunden. Und für blaue OLEDs, in denen Schäden wegen der hohen Energie der Exzitonen besonders groß sind, gibt es bislang überhaupt keine Lösung.

Blaue Bildpixel heutiger OLED-Displays sind daher wesentlich ineffizienter. „Sie müssen viel größer als die roten und grünen Pixel designt werden“, sagt Blom. Denn nur so erreichen sie eine Leuchtkraft, die mit den roten und grünen Pixeln mithält und ein ausgewogenes Bild ergibt. Und diese Pixel sind kompliziert aufgebaut, weil die energiegeladenen Elektronen und Löcher möglichst verlustfrei in eine ultradünne Schicht in ihrer Mitte geleitet werden müssen,

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Organische Leuchtdioden ermöglichen energieeffiziente Bildschirme mit satten Farben, die künftig durch Drucken einfach herzustellen sein könnten. Bislang sind jedoch vor allem Effizienz und Lebensdauer blauer OLEDs beschränkt, und ihre Produktion ist kompliziert.

Mainzer Forschende haben einfach herzustellende blaue OLEDs entwickelt, deren Effizienz an die kommerzieller roter und grüner OLEDs heranreicht. Sie verwendeten organische Moleküle, die sich zu einer Art Koaxialkabel mit einem leitenden Kern und einer vor Verunreinigungen schützenden Hülle anordnen.

Für die technische Anwendung muss die Lebensdauer des Materials noch erhöht werden.

wo sie aufleuchten sollen. Dabei sollen sich möglichst wenige Exzitonen vorzeitig vereinigen, damit sie keine Schäden anrichten. „OLED-Bildpixel bestehen aus bis zu sieben oder acht Schichten“, erläutert Blom. Solche Bildpixel lassen sich nur aufwendig durch schichtweises Aufdampfen der Moleküle herstellen. Das ließ den Traum von druckbaren OLED-Displays platzen – vorerst. Heute gelte, so Blom, das Dogma, dass druckbare OLEDs aus nur einer organischen Halbleiterschicht technisch erledigt sind. Für eine solche Idee gebe es daher auch keine Forschungsgelder. „Das wird sofort abgeschmettert.“ Die Max-Planck-Gesellschaft ermöglicht solche Forschung jedoch. Denn Blom und Wetzelaer sind sich sicher: Langlebige blaue OLEDs aus einer einzigen Schicht sind möglich, und sie können mindestens genauso effizient sein wie die etablierten Multischicht-OLEDs. „Unsere Modellrechnungen haben das schon früh gezeigt“, sagt Blom. Entscheidend seien geschickt designte organische Halbleiter und Elektroden.

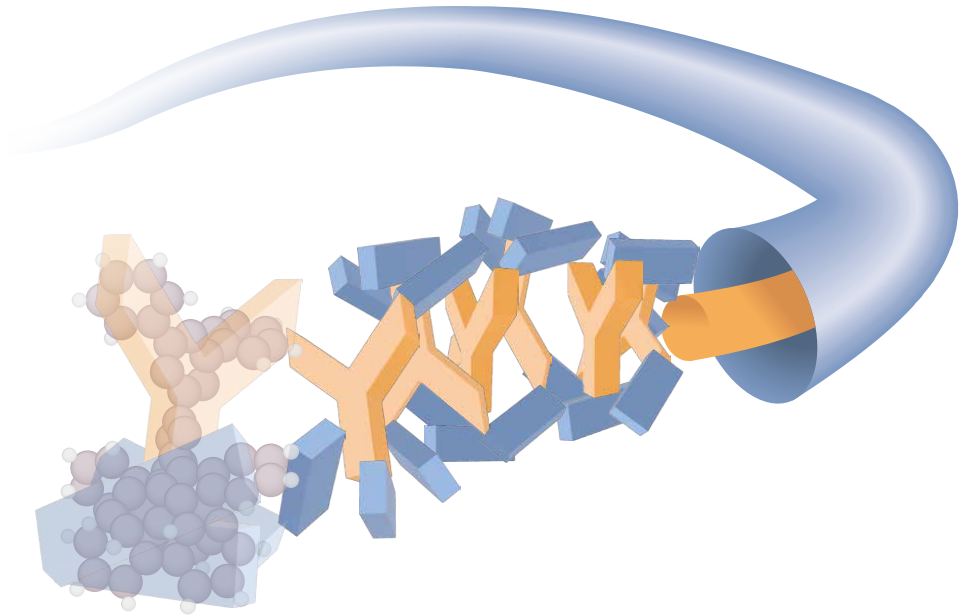
Tatsächlich sind die Mainzer Forschenden auf einem guten Weg. 2023 haben sie eine Einschicht-OLED präsentiert, die himmelblau leuchtet. Dabei gelang es ihnen, alle Exzitonen zum Leuchten zu bringen. Knapp 30 Prozent des Lichts strahlt die OLED durch die transparente Elektrode nach außen ab, das liegt bereits auf dem Niveau kommerzieller OLEDs.

Ein molekulares Koaxialkabel

Dieser Durchbruch erforderte einen nahezu verlustfreien Transport der Elektronen und Löcher durch den einschichtigen organischen Halbleiter bis zur strahlenden Hochzeit. Besonders empfindlich sind die Elektronen: Schon extrem wenige Defekte im Material reichen, um zu viele Elektronen unterwegs abzufangen. Das ist gerade beim Blau ein großes Problem. Deshalb entwickelten die Mainzer Moleküle, die aus zwei Teile bestehen. Der Teil, der die Elektronen leitet, ist zwar empfindlich gegenüber Verunreinigungen, der andere aber nicht. In der Diode ordnen sich diese Moleküle spiralförmig an. Den Kern der Spirale bilden dabei die empfindlichen Molekülteile, die sehr gut Elektronen leiten. Die unempfindlichen Teile ordnen sich am Rand der Spirale an, sodass sie den Elektronenleiter wie eine Art Isolierschicht umhüllen. „Das Ergebnis ist eine Art molekulares Koaxialkabel“, sagt Blom. Das Besondere: Das neue Material leitet nicht nur die elektrischen Ladungen gut, es sendet auch direkt das Licht aus. Diese beiden Vorgänge finden in blauen OLEDs bislang in unterschiedlichen Materialschichten statt. Das neue Konzept vereinfacht also auch das Design blauer OLEDs.

Damit rücke die Vision druckbarer Einschicht-OLEDs näher, meint Blom. Aber selbst mit dem etablierten Aufdampfverfahren wären Einschicht-OLEDs schon viel günstiger herstellbar. Allerdings ist noch weitere Forschung nötig, um die Lebensdauer der blauen Einschicht-OLEDs zu verlängern. Immerhin gelang dem Team jüngst ein reinerer Blauton, der – anders als das rotstichige Himmelblau – bereits technisch anwendbar wäre. Ein Patentantrag wäre allerdings noch verfrüht, meint Blom: „Ich schätze, dass dafür noch zehn Jahre Entwicklungszeit nötig sein werden.“ ←

Schützende Hülle, leitender Kern: Das Mainzer Team hat organische Moleküle mit zwei Teilen synthetisiert. Der eine Teil transportiert Strom (orange), der andere schirmt den störenden Einfluss von Verunreinigungen ab (blau). Die Moleküle ordnen sich zu einer Art Koaxialkabel mit den leitfähigen Komponenten im Inneren an.



GRAFIK: GCO NACH MPI FÜR POLYMERFORSCHUNG

GLOSSAR

EXZITON
wird ein Paar aus einem negativen Elektron und einem positiv geladenen Loch genannt, das sich noch nicht vereinigt hat. Für effiziente OLEDs müssen sich möglichst alle Exzitonen unter Abgabe von Licht vereinigen.

ORGANISCHE LEUCHTDIODE
kurz OLED, heißt eine Diode, in der das Licht in einem organischen Halbleitermaterial erzeugt wird. Das ermöglicht prinzipiell die Herstellung in Druckverfahren.