

Vom Handy bis zum Fernseher

Organische Leuchtdioden ermöglichen neuartige Flachdisplays.

Karl Leo, Jan Blochwitz-Nimoth und Oliver Langguth

Sperrige Röhrenbildschirme weichen nach und nach den flachen Flüssigkristall- und Plasma-Displays, die jedoch ihre Nachteile haben, z. B. große Lichtverluste und hohen Energieverbrauch. Hier könnten Flachdisplays auf Basis organischer Leuchtdioden eine vielversprechende Alternative sein.

Die physikalischen Prinzipien, die bei modernen Flachdisplays zur Anwendung kommen, unterscheiden sich deutlich. Zurzeit dominieren Flachdisplays auf Basis von Flüssigkristallen (Liquid Crystal Displays, LCD) den Markt. Das sind im Prinzip „optische Ventile“, d. h. die Bewegung von Flüssigkristallmolekülen im elektrischen Feld schaltet dabei ein durch gekreuzte Polarisatoren realisiertes Lichtventil. LCDs haben sich seit ihrer Erfindung Ende der 1960er-Jahre von kleinen monochromen Displays für einfache Anwendungen zu Vollfarbdisplays mit Bilddiagonalen von weit über einem Meter entwickelt. Doch diese Displays haben erhebliche Nachteile: Viel Licht geht verloren, sodass meist nur rund ein Zehntel davon beim Betrachter ankommt. Außerdem hängt die Bildwirkung mehr oder weniger stark vom Blickwinkel ab, und die Schaltgeschwindigkeit ist durch die mechanische Bewegung der Flüssigkristallmoleküle begrenzt, was zu „Nachzieheffekten“ führt.

Breite Marktdurchdringung erzielten die Plasma-displays. In diesen wird in jedem Bildpunkt (Pixel) ein kleines Plasma gezündet, dessen UV-Strahlung durch Konversion in Phosphorschichten die verschiedenen Farben erzeugt. Obwohl diese Technologie heute sehr große Farbdisplays mit hoher Helligkeit und gutem Kontrast erlaubt, besitzt sie ebenfalls deutliche Nachteile: Der Energieverbrauch ist vergleichsweise hoch, zudem ist die Auflösung im Vergleich zu LCD-Bildschirmen begrenzt. Echtes High Definition-Fernsehen (HDTV) ist erst ab relativ großen Bildschirmdiagonalen von 40 Zoll und mehr möglich.

Ein besserer Ansatz wäre ein selbst emittierendes Flachdisplayprinzip, welches das „kalte Licht“ von Leuchtdioden (LED) nutzt. In LEDs werden zunächst Elektronen und Löcher in eine Halbleiterstruktur injiziert. Wenn diese rekombinieren, senden sie Photonen aus. Prinzipiell wäre es also möglich, mit Leuchtdioden aus III-V-Halbleitern Displays zu realisieren. Solche Displays finden sich z. B. als große Videoleinwände in Sportstadien, sie sind jedoch aufgrund der hohen



Dieses organische Vollfarb-Display von Sony mit einer Bilddiagonalen von 11 Zoll ist bereits im Handel erhältlich.

Montagekosten sowie der Inhomogenitäten für eine breite Anwendung ungeeignet.

Um das Jahr 1960 gelang es erstmals, Elektrolumineszenz, also die Emission von Licht aufgrund eines elektrischen Stroms, in organischen Einkristallen zu beobachten. Damals war an eine Anwendung allerdings kaum zu denken. Die Erfindung der ersten organischen Dünnschicht-Leuchtdiode 1987 durch Ching Wan Tang und Steven Van Slyke bei Eastman Kodak (Rochester, USA) bedeutete jedoch einen Durchbruch, auch wenn ihre Effizienz von etwa einem Lumen pro Watt elektrische Leistung nur der Energieeffizienz einer Kerze entsprach. Einige Jahre später konnten Richard Friend und seine Mitarbeiter in Cambridge

KOMPAKT

- Organische Leuchtdioden (OLED) ermöglichen energie-sparende, selbstleuchtende und besonders dünne Flachbildschirme.
- Kleinere Displays, z. B. für Mobiltelefone, existieren bereits, für größere Bildschirme gilt es jedoch, die Effizienz und Lebensdauer der OLEDs weiter zu erhöhen und geeignete Aktiv-Matrix-Ansteuerungen zu entwickeln.
- Eine besondere Herausforderung besteht auch darin, das erzeugte Licht effizienter aus der OLED auszukoppeln.
- Rote OLEDs erreichen mittlerweile Rekordlebensdauern von bis zu einer Million Stunden.

Prof. Dr. Karl Leo,
Institut für Ange-
wandte Photophysik,
Technische Univer-
sität Dresden,
01062 Dresden
Dr. Jan Blochwitz-
Nimoth, Dipl.-Phys.
Oliver Langguth,
Novaled AG,
Tatzberg 49, 01307
Dresden

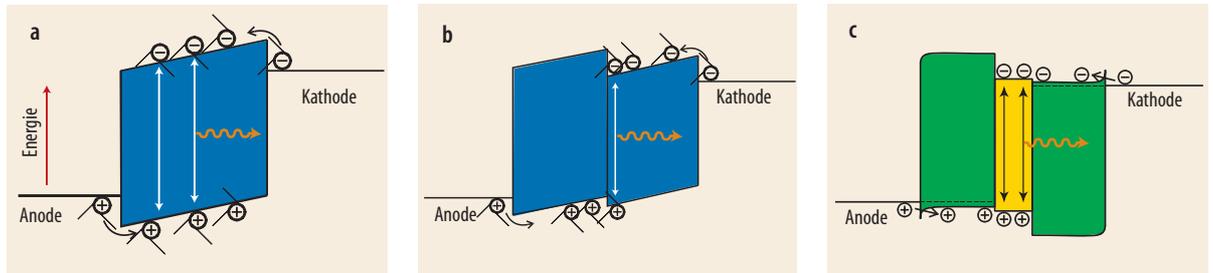


Abb. 1 In einer Einschicht-LED (a) können die Ladungsträger auch als Ohmscher Strom durch das Bauelement fließen und damit für die Rekombination verloren gehen; auch wird die strahlende

Rekombination in der Nähe der Kontakte gelöscht. Beim Zweischichtprinzip (b) mit einer elektronen- und einer löcherleitenden Substanz können die Elektronen und Löcher an der Schichtgrenz-

fläche rekombinieren. Dadurch steigt die Effizienz sehr stark an. Eine optimierte Struktur weist die sog. pin-OLED auf, die auf dotierten leitfähigen Schichten beruht (c).

(Großbritannien) zeigen, dass ein analoger Effekt mit halbleitenden Polymerschichten möglich ist, die aus Lösung aufgebracht werden und sich unterschiedlich anordnen lassen (Abb. 1) [1]. Damit eröffneten sich völlig neue Perspektiven: Erstmals stand eine hocheffiziente, flache, „kalte“ Lichtquelle zur Verfügung, mit der prinzipiell dünne (< 1 mm) und flexible Displays möglich waren. Für kleinere Geräte wie Handys oder MP3-Player sind solche Displays seit einiger Zeit kommerziell erhältlich. Für größere Diagonale existieren überzeugende Demonstratoren und erste Produkte.

Materialien und Ansteuerung

Die Frage, ob sich oligomere Substanzen („small molecules“) oder Polymere besser für die Fertigung organischer Displays eignen, lässt sich derzeit noch nicht klar beantworten. Große Hoffnung ruhten zunächst aufgrund der relativ einfachen Drucktechniken für flüssige Substanzen auf den Polymeren, doch haben sich in den letzten Jahren die sublimierten Substanzen praktisch vollständig auf dem Markt durchgesetzt. Die Gründe dafür sind sehr vielfältig: Neben den Kosten der Abscheidung spielen auch Aspekte wie Materialpreise und Stabilität eine Rolle. Hier hat sich gezeigt, dass die trockene Vakuumpräparation tendenziell zu besseren Stabilitäten führt. Für größere Flachbildschirme wird vermutlich längerfristig eine direkte Abscheidung der verschiedenen Farben als Bildelement verlangt. Bei flüssigen Substanzen besteht die Möglichkeit, diese z. B. durch Inkjet-Drucken zu strukturieren, während Vakuumtechniken bisher mit Schattenmasken arbeiten, die auf großen Flächen gegebenenfalls nicht anwendbar sind. Somit ist derzeit noch offen, ob sich eine der beiden Techniken durchsetzen kann.

Entscheidend ist hierbei auch die Art der Display-Ansteuerung: Bei kleinen Displays z. B. von MP3-Spielern und Klapp-Mobiltelefonen handelt es sich meist um Passiv-Matrix-Displays, bei denen die Ansteuerung der einzelnen Pixel durch gekreuzte Leiterbahnen geschieht (Abb. 2a). Das Gegenstück dazu sind Aktiv-Matrix-Displays, bei denen an jedem Bildpunkt die Bildinformation durch Transistoren geschaltet wird.

Bei Flüssigkristall-Displays höherer Auflösung ist die Aktiv-Matrix-Ansteuerung zum Standard gewor-

den. Diese ist für organische Displays mit höherer Auflösung ebenfalls zwingend, da die elektrischen Verluste für Passiv-Matrix-Ansteuerung mit zunehmender Zeilenzahl überproportional zunehmen. Allerdings verlangen Aktiv-Matrix-Displays auf Basis organischer Leuchtdioden aufwändigere Ansteuererschaltungen. Zum einen benötigen organische Leuchtdioden ein Stromsignal, sodass nicht unerhebliche Ströme durch die Treibertransistoren fließen müssen; zum anderen sind pro Bildelement mindestens zwei Transistoren und ein Kondensator, für den Ausgleich von Helligkeitsinhomogenitäten sogar drei bis sechs Transistoren erforderlich (Abb. 2b). Im Gegensatz dazu genügt bei Aktiv-Matrix-Substraten für Flüssigkristall-Displays ein Transistor.¹⁾

Ansätze für die Optimierung

Ein entscheidender Aspekt, um die Effizienz organischer Leuchtdioden zu verbessern, ist die Rekombinationswahrscheinlichkeit der Elektronen und Löcher. In organischen Halbleitern bilden diese zunächst relativ stark gebundene Frenkel-Exzitonen, von denen sich bei elektrischer Anregung aufgrund der Spin-Statistik nur ein Viertel in einem Singulett-Zustand, dreiviertel aber in einem Triplett-Zustand befinden (vgl. den Artikel von W. Brütting und W. Rieß). In normalen organischen Farbstoffen gehen die Triplett-Exzitonen durch nicht-strahlende Rekombination verloren. Die Gruppen um Mark Thompson (Univ. of Southern California, USA) und Stephen Forrest (Princeton University, USA) haben jedoch phosphoreszierende organische Moleküle entwickelt, in denen sich durch eine starke Spin-Bahn-Kopplung die Singulett- und Triplett-Zustände mischen und sich deswegen theoretisch alle elektrisch erzeugten Exzitonen nutzen lassen. Nachteile dieses Ansatzes sind allerdings die heute noch zu kurze Betriebslebensdauer der blauen Triplett-Emitter und ihr größerer Effizienzabfall verglichen mit Singulett-Emittern bei hohen Stromdichten. Letzteres liegt indirekt daran, dass die Rekombinationsdauer der Triplett-Exzitonen immer noch einige Größenordnungen über der der Singulett-Exzitonen liegt (1 μ s im Vergleich zu ca. 10 ns) und daher Löschung durch Triplett-Triplett-Annihilation vermehrt eine Rolle spielt.

¹⁾ Dabei ist die Ausföhrung im amorphen Silizium trotz dessen Alterung unproblematisch, da nur eine Spannung zwischen zwei Stellwerten geschaltet werden muss.

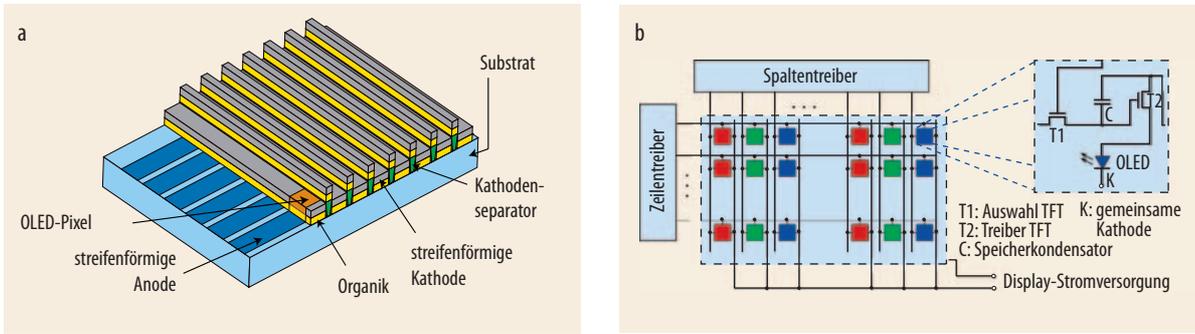


Abb. 2 Bei einem monochromen Passiv-Matrix-Display (a) lassen sich die einzelnen Pixel über gekreuzte Leiterbahnen ansteuern. Bei Aktiv-Matrix-Displays (b) wird die Bildinformation an jedem Bildpunkt durch Transistoren geschaltet.

Für die Leistungseffizienz ebenso bedeutend ist die Betriebsspannung, bei der eine bestimmte Helligkeit erreicht wird. Je niedriger diese ist, desto höher ist die erwartete Leistungseffizienz. Hier unterscheiden sich anorganische von organischen Halbleiter-Bau-elementen: In anorganischen Kristallhalbleitern ist die Ladungsträgerbeweglichkeit sehr hoch und damit auch ihre Leitfähigkeit (nach Dotierung). Das erlaubt geringe elektrische Verluste in den LEDs und führt zu einer steilen Kennlinie und niedrigen Betriebsspannungen am thermodynamischen Limes (ca. 2 – 3 V abhängig von der Emissionsfarbe). OLEDs wiesen hingegen anfangs Betriebsspannungen auf, die ein Vielfaches davon waren. Erste Ideen zur Dotierung in organischen Halbleitern entstanden in Japan Anfang der 90er-Jahre, allerdings auf der Basis von tendenziell instabilen Alkalimetallen. Anfang des neuen Jahrtausends wurden Erfolg versprechende Ergebnisse zur stabilen Dotierung von OLED-Transportschichten präsentiert.

Das Licht der organischen Leuchtdiode entsteht in einem Schichtsystem und kann

- das Substrat durchdringen und in den freien Raum entweichen (Einkopplung in eine externe Mode),
- das organische Schichtsystem verlassen, aber im Substrat durch Totalreflexion eingefangen werden und dort als Zick-Zack-Mode laufen oder
- das Schichtsystem aus Organik und Anode überhaupt nicht verlassen, sondern sich als Wellenleitermode ausbreiten; dort wird es nach relativ kurzer Zeit absorbiert und geht verloren.

Theoretische Überlegungen zeigen, dass bei einer flachen Struktur nur etwa 20 % des Lichts in die ex-

ternen Moden gehen; die restlichen 80 % teilen sich etwa zur Hälfte auf das Substrat und die organischen Schichten auf. Die größte Herausforderung der Forschung besteht also darin, Methoden zu finden, mit denen sich der Anteil der externen Moden deutlich steigern lässt. Während dies für die im Substrat geführten Moden noch relativ einfach durch Maßnahmen wie z. B. das Aufrauen des Substrats erreichbar ist, bedarf das Auskoppeln der Wellenleitermoden eines Eingriffs in die aktiven Schichten der OLED. Hier sind bisher nur bescheidene Fortschritte erzielt worden.

Heute lassen sich mit Triplett-Emittern, der Dotierung sowie ersten Fortschritten bei der Auskoppelerhöhung für OLEDs Leistungseffizienzen von bis zu 130 lm/W (grüne Emission) bzw. 30 – 65 lm/W (weiße Emission) erreichen (jeweils bei der anwendungsrelevanten Helligkeit von 1000 cd/m²).

Am Anfang der OLED-Entwicklung bestanden erhebliche Zweifel, ob produktrelevante Betriebslebensdauern überhaupt möglich sind. Mittlerweile hat man erhebliche Fortschritte hinsichtlich stabiler Materialien und des Stackdesign erreicht, vor allem in und um die Emissionszone, da dort Oxidation und Reduktion von organischen Molekülen auftreten können. Heutige Rekordlebensdauern liegen bei roten OLEDs mittlerweile bei bis zu einer Million Stunden, also rund 100 Jahren!²⁾

Die angegebenen Lebensdauern für OLEDs gelten auf Basis von Oligomeren. Polymere OLED-Lebensdauern sind deutlich kürzer, insbesondere wenn diese durch Druckverfahren aufgebracht werden. Diese Lebensdauer lässt sich aber nicht einfach auf die Lebensdauer eines Displayprodukts übertragen und

2) Aufgrund der hohen Lebensdauern werden diese im Labor mithilfe höherer Starthelligkeiten oder Temperaturen beschleunigt gemessen. Als Faustregel lebt eine doppelt so hell betriebene OLED ca. drei- bis viermal kürzer.

Substrat-emittierende OLEDs							
Farbe	Emitter	CIE-Farbkord. (x/y) ^{#)}	Spannung in V ^{#)}	Strom-Effizienz in cd/A ^{#)}	Leistungs-Effizienz in lm/W ^{#)}	Quanten-Effizienz in % ^{#)}	Lebensdauer in 1000 Std. ^{§)}
grün	phosphoreszierend	0,37/0,60	2,5	65	85 ^{§)}	19	150
rot	fluoreszierend	0,66/0,34	2,5	10	13	8,5	200 (Triplett) 1000 (Singulett)
blau	fluoreszierend	0,14/0,15	3,5	6,1	5,4	5,0	10 bis 20
weiß (Display)	fluoreszierend	0,35/0,35	3,3	13	15 ^{§)}	5,4	20 bis 100
weiß (gestapelt, Beleuchtung)	hybrid	0,43/0,44	8,3	112	35 ^{§)}	> 32	> 100

*) gemessen in der Ulbricht-Kugel

#) bei 1000 cd/m²

§) bis 50 % der anfänglichen Helligkeit

hängt vom relativen Anteil der einzelnen Farben und dem Benutzungsmodus ab. OLED-Displays haben aber den Vorteil, dass Pixel, die im Bild ein geringes Helligkeitssignal aufweisen, auch wenig elektrische Leistung benötigen und weniger altern. Ersteres ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber passiven Displaytechnologien wie LCD, verursacht aber auch Nachteile: erstens „Image Sticking“, d. h. feste Bildinhalte wie Logos „brennen“ sich in den Bildschirm ein – man kennt dies von Kathodenstrahlröhren oder Plasma-Bildschirmen, speziell auf Bahnhöfen und anderen öffentlichen Plätzen, und zweitens „Differential Ageing“, d. h. Farben altern unterschiedlich schnell, sodass sich pixelabhängig die Farben verschieben. Insofern ist die Definition der OLED-Lebensdauer als Abfall auf 50 % nicht hinreichend. Studien von Anwendern wie Nokia beschäftigen sich intensiv mit der Simulation von Alterungseffekten auf Displayniveau und kommen zu dem Schluss, dass obige Lebensdauern für videodarstellende Handydisplays ausreichen. Interessanterweise ergaben diese Simulationen, dass die Alterungseffekte dann sichtbar werden, wenn der „schlechteste“ Pixel ein Zehntel Helligkeit verloren hat. Abschätzungen gehen davon aus, dass speziell für grün und blau noch deutliche Verbesserungen notwendig sind, um OLEDs für TV-Flachbildschirme kompatibel zu machen. Es besteht jedoch Grund zur Hoffnung, denn die Lebensdauern haben sich seit den ersten Arbeiten 1987 ca. alle vier Jahre verzehnfacht!

Von der Forschung zur Produktion

Die aktuelle Forschung an organischen Leuchtdioden arbeitet weiter intensiv an ihrer Effizienz, Lebensdauer und Integrierbarkeit in das Display [2]. Die Tabelle fasst den aktuellen Stand bei der Effizienz der Leuchtdioden zusammen: Für die drei Grundfarben rot, grün und blau wurden bereits vergleichsweise gute Werte erreicht. Die erzielten Bestwerte für grüne organische Leuchtdioden liegen erstaunlicherweise sogar deutlich oberhalb derjenigen der bisher besten anorganischen Leuchtdioden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass zum einen die optische Auskopplung aus organischen Leuchtdioden aufgrund der niedrigen Brechungsindizes begünstigt ist und zum anderen die Rekombinationseffizienz der organischen Materialien relativ hoch ist, während diese bei grünen anorganischen LEDs noch zu wünschen übrig lässt.

Damit OLED-Displays langfristig gegen LCDs bestehen können, muss sich die Fertigung noch entscheidend verbessern, etwa in Bezug auf Substratgröße, Taktzeit und Materialausbeute. So gelangen bei den Standardverfahren für die Herstellung kleiner Passiv- und Aktiv-Matrixdisplays (Materialverdampfung im Vakuum aus Punktquellen) nur ca. 5 % des kostspieligen OLED-Materials auf das Display, der Rest geht in den Vakuumkammern verloren. Durch neue Produktionsverfahren³⁾ lässt sich über 50 % mehr Material ausnutzen und auch die Taktzeit verkürzen.

3) Wie Linienquellen (z. B. bei Applied Materials Alzenau) und OVPD-Quellen (Organic Vapour Phase Deposition; Aixtron, Aachen).

4) Dies führt zwar zu Effizienzverlusten durch die Farbfilter, welche sich jedoch mit dem sog. RGBW-Ansatz deutlich reduzieren lassen: Dabei wird ein Pixel einfach in vier Subpixel unterteilt, und Farbfilter werden nur für drei Subpixel verwendet (RGB); der vierte Subpixel emittiert weißes Licht.

Bei der LCD-TV-Displayproduktion nutzt man heute bereits Substratgrößen von ca. 3 × 2 Metern, womit sich viele große Flachbildschirme gleichzeitig produzieren lassen. Vollfarb-OLED-Displays werden heute mittels Schattenmasken als RGB-Display produziert, wobei die Pixel in Streifen nebeneinander angeordnet sind. Während des Herstellungsprozesses der roten Streifen deckt also eine Lochmaske den Bereich der grünen und blauen OLEDs ab. Dies bereitet aber bei größeren Substraten wegen thermischer Ausdehnung der Maske Probleme. Daher geht hier der Trend ab ca. 15 Zoll zu einer unstrukturierten weißen OLED verbunden mit Farbfiltern auf dem Substrat. Da OLEDs wegen des Image Sticking vorrangig für die Darstellung bewegter Bilder (Video, TV) zum Einsatz kommen sollen und typische Bilder eine eher geringe Farbsättigung (also einen hohen Weißanteil) aufweisen, kann der direkte weiße Pixelbereich die Effizienz des OLED-Displays erheblich steigern. Solche weißen OLEDs lassen sich prinzipiell auch auf großen Substraten herstellen, da keine Feinmaskierung notwendig ist. Langfristig sollten die Kosten von OLED-Displays bei ca. 70 % der LCD-Displays liegen, da die Hinterleuchtung komplett wegfällt.

Zusammen mit ihren überlegenen technischen Eigenschaften sollten damit OLED-Displays die Bildschirmtechnologie anführen.

*

Wir danken dem Freistaat Sachsen, dem BMBF, der DFG sowie der EU für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Z. H. Kafafi (Hrsg.), Organic Electroluminescence, Taylor & Francis, Boca Raton (2005); J. Kalinowski, Organic Light Emitting Diodes, Marcel Dekker, New York (2005)
- [2] K. Walzer et al., Chem. Rev. **107**, 1233 (2007) [Sonderheft „Organic Electronics and Optoelectronics“]

DIE AUTOREN

Karl Leo (FV Halbleiterphysik) studierte Physik in Freiburg und promovierte an der Uni Stuttgart. Von 1989 bis 1991 war er Postdoc bei den Bell Laboratories in Holmdel (New Jersey) und ab 1991 Oberassistent an der RWTH Aachen. Seit 1993 arbeitet er am Institut für Angewandte Photophysik der TU Dresden, zusätzlich leitet er das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme in Dresden.



Jan Blochwitz-Nimoth (FV Chemische Physik) studierte Physik in Dresden und Oldenburg. Nach einem Jahr Tätigkeit im Bereich der anorganischen Optoelektronik und Lichtprojektionsgeräte kehrte er ans Institut für Angewandte Photophysik zurück, um dort zu promovieren. Er ist heute technischer Vorstand der Novalad AG und maßgeblicher Entwickler der Novalad PIN-OLED™-Technologie.



Oliver Langguth studierte bis 2002 Physik an der TU Dresden. Seit seiner Diplomarbeit in der Arbeitsgruppe von Karl Leo arbeitet er bei der Novalad AG an der Weiterentwicklung von OLEDs und ist dort u. a. für die Entwicklung von Messsystemen für die OLED-Charakterisierung und alle Arten von Ansteuerung zuständig.

