



# Bismut-haltige p-Dotanden mit großer Bandlücke für optoelektronische Anwendungen

Sébastien Pecqueur, Anna Maltenberger, Marina A. Petrukhina, Marcus Halik, Arndt Jaeger, Dominik Pentlehner und Günter Schmid\*

Halbleiter auf Basis (organischer) Moleküle sind für die Verwendung in innovativen optoelektronischen Bauteilen von großem Interesse.<sup>[1–3]</sup> Diese „weichen“ Materialien ermöglichen neuartige Funktionalitäten wie Transparenz und Flexibilität,<sup>[4,5]</sup> die bereits in ersten kommerziellen Bauteilen, z.B. organischen Leuchtdioden (OLEDs), genutzt werden.<sup>[6]</sup> Besonders für die Anwendung in der OLED-Beleuchtung ist es jedoch nötig, die Effizienz und Lebensdauer der Bauteile bei gleichzeitiger Kostenreduktion weiter zu erhöhen. Eine der wichtigsten Strategien, die Leistungsfähigkeit organischer Halbleiter zu verbessern, ist, sie zu dotieren.<sup>[7]</sup> Die Dotierung erhöht die Effizienz der Bauteile, indem ihr Gesamtwiderstand und damit ihre Leistungsaufnahme gesenkt wird. Der größte Nachteil von p- und n-Dotierung für optoelektronische Anwendungen wie OLEDs ist die oftmals auftretende Bildung von offenschaligen Radikalen oder Ladungstransfer-Komplexen, die das emittierte Licht absorbieren können.<sup>[8–10]</sup> Um von der Dotierung zu profitieren, sollten Dotanden daher 1) effizient dotieren und prozessierbar sein, 2) eine große optische Bandlücke (größer 3.1 eV) haben und 3) auch durch die Dotierung keine Spezies bilden, die Licht im sichtbaren Spektralbereich absorbiert.

Da die p-dotierten Schichten in OLEDs in der Regel dicker sind als die n-dotierten,<sup>[11,12]</sup> ist der Bedarf an dotierten organischen Halbleitern (OSCs; organic semiconductors) mit niedriger Absorption für p-dotierte Schichten höher als für n-dotierte. Es gibt mehrere Möglichkeiten zur p-Dotierung von OSCs. Organische Elektronenakzeptoren wie F<sub>4</sub>TCNQ

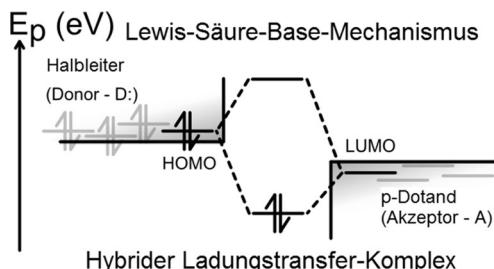
(2,3,5,6-Tetrafluortetracyanochinodimethan) stellen einen leistungsfähigen und effizienten Weg dar, die elektrische Leitfähigkeit von Lochtransportmaterialien (HTMs; hole transport materials) für OLEDs zu erhöhen.<sup>[7,13,14]</sup> Allerdings ist F<sub>4</sub>TCNQ vergleichsweise teuer und zeigt eine starke intrinsische Absorption im sichtbaren Spektralbereich (optische Bandlücke von ca. 2.5 eV).<sup>[10]</sup> Mit F<sub>4</sub>TCNQ dotierte HTM-Filme erscheinen aufgrund einer Absorption im grünen bis roten Spektralbereich (2.0 eV bis 1.1 eV)<sup>[10]</sup> farbig. Auch kostengünstigere Alternativen wie z.B. Übergangsmetalloxide (TMOs; transition metal oxides) sind weit verbreitet.<sup>[15–17]</sup> TMOs dotieren HTMs effizient und zeichnen sich durch eine große intrinsische Bandlücke (ca. 3 eV)<sup>[18]</sup> aus. Die dotierten HTMs absorbieren allerdings meist stark im sichtbaren Spektralbereich.<sup>[8,9]</sup> Zudem ist die Sublimationstemperatur von TMOs in der Regel hoch, weshalb sie durch Vakuumverdampfung nur schwer prozessierbar sind.<sup>[19]</sup>

Metallorganische Lewis-Säuren sind Elektronenakzeptoren, die die Flüchtigkeit und damit Prozessierbarkeit organischer Materialien mit den niedrigen Kosten der TMOs kombinieren und damit Kandidaten für p-Dotierstoffe darstellen. Das Potential anorganischer Lewis-Säuren wie FeCl<sub>3</sub>, SbCl<sub>5</sub> und BiF<sub>3</sub> wurde bereits in OLEDs gezeigt,<sup>[21,22]</sup> wobei ihre geringe Molekülgröße allerdings zu verstärkter Diffusion in andere Schichten des Bauteils führt. Lewis-saure fluorierte Benzoato-Kupfer(I)-Komplexe wurden vor kurzem ebenfalls als p-Dotanden beschrieben.<sup>[20]</sup>

Die Einführung von Lewis-Säuren in einen Lochleiter kann zur Bildung von Lewis-Säure-Base-Addukten führen, da die meisten HTMs für OLEDs Arylamine<sup>[23,24]</sup> und damit Lewis-Basen mit freien Elektronenpaaren und π-π-delokalisierten Elektronen darstellen. Die Bildung von Lewis-Säure-Base-Addukten wurde störungstheoretisch beschrieben und entspricht einer Bildung von hybriden Ladungstransfer(CT)-Komplexen, die sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht wurden.<sup>[10,25]</sup> Solche Addukte haben ihre eigene Bandlücke (siehe Abbildung 1), die im ungünstigen Fall die Effizienz einer OLED durch Absorption vermindern können.

In dieser Arbeit werden Tris(carboxylato)bismut(III)-Komplexe als p-Dotanden für HTMs in OLEDs beschrieben. Die dotierten HTMs zeigen eine erhöhte Leitfähigkeit, die mit dotierten OSCs aus dem Stand der Technik vergleichbar ist. Des Weiteren zeichnen sich die dotierten HTMs durch eine hohe Transparenz aus, da die intrinsische Bandlücke der Dotanden im UV und die Bandlücke der resultierenden Addukte im IR liegt. Diese Verbindungsklasse wurde untersucht, da Bismut ein nicht-toxisches Element ist und Bi<sup>III</sup>-Verbindungen eine große Koordinationssphäre für die Bildung stabiler CT-Komplexe als Voraussetzung für die Do-

[\*] Dr. S. Pecqueur, A. Maltenberger, Dr. G. Schmid  
Siemens AG, Corporate Technology  
Guenther-Scharowsky-Straße 1, 91058 Erlangen (Deutschland)  
E-Mail: guenter.schmid@siemens.com  
  
Dr. S. Pecqueur, Prof. Dr. M. Halik  
Organic Materials and Devices, Universität Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 7, 91058 Erlangen (Deutschland)  
  
Prof. Dr. M. A. Petrukhina  
Department of Chemistry, University at Albany  
1400 Washington Avenue, Albany, NY 12222 (USA)  
  
Prof. Dr. A. Jaeger, Dr. D. Pentlehner  
Osram OLED GmbH  
Wernerwerkstraße 2, 93049 Regensburg (Deutschland)  
  
Dr. S. Pecqueur  
Derzeitige Adresse: Institute of Electronic Microelectronics and  
Nanotechnology, Av. Poincaré, 59652 Villeneuve d'Ascq. (Frankreich)  
  
Prof. Dr. A. Jaeger  
Derzeitige Adresse: Hochschule Esslingen  
Flandernstraße 101, 73732 Esslingen (Deutschland)  
  
Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind unter:  
<http://dx.doi.org/10.1002/ange.201601926> zu finden.



**Abbildung 1.** Grenzorbital-Diagramm eines hybriden CT-Komplexes aus einem organischen Halbleiter (Donor) und einem p-Dotanden (Akzeptor) bzw. eines Lewis-Säure-Base-Addukts aus einem Elektronenpaar-Donor und einem Elektronenpaar-Akzeptor.

tierung von HTMs besitzen.<sup>[26]</sup> Des Weiteren kann die Elektrophilie bzw. Lewis-Azidität der Bi<sup>III</sup>-Komplexe durch Variieren der Carboxylato-Liganden gesteuert werden.<sup>[27-30]</sup>

Durch Verwendung von Lewis-Säuren anstelle von Oxidationsmitteln wird die Dichte der lichtabsorbierenden HTM<sup>+</sup>-Radikalkationen in den dotierten Schichten aufgrund eines nur teilweisen Ladungstransfers deutlich reduziert. Eine Serie von Carboxylato-Bismut(III)-Komplexen mit unterschiedlichen Substitutionsmustern und Fluorierungsgraden wurde im Rahmen dieser Arbeit synthetisiert (Abbildung 2 und Hintergrundinformationen) bzw. käuflich erworben (Tris(acetato)bismut(III)). Die Verbindungen wurden durch Sublimation gereinigt (ca. 230 °C bei 10<sup>-6</sup> mbar, mindestens zweimal) und die zehn flüchtigen Verbindungen auf ihre Eignung als p-Dotanden untersucht. Das Dotierverhalten ist abhängig vom Substitutionsmuster und ihrer Konzentration in der aufgedampften Schicht. Die Strom-Spannungs-Kennlinien der dotierten HTMs verbessern sich dabei von den Fluor-armen zu den Fluor-reichen Dotanden um Größenordnungen (siehe Hintergrundinformationen für die detaillierten Kennlinien). Die elektrische Leitfähigkeit der Schichten wurde an Bauteilen mit ineinander greifenden ITO-Elektroden gemessen. Die stark erhöhten Stromdichten der Dioden im Vergleich zu den undotierten HTMs belegen eine p-Dotierwirkung (Abbildung 3). Die höchste Leitfähigkeit von 2.3 × 10<sup>-4</sup> S cm<sup>-1</sup> wurde durch Dotierung von Bi(tfa)<sub>3</sub> in spiro-TTB mit einem Stoffmengenanteil von 1:2 erreicht. Sie ist damit eine Größenordnung höher als bei einer Dotierung mit F<sub>4</sub>T-CNQ<sup>[34]</sup> und in derselben Größenordnung wie bei der Dotierung mit einem weit verbreiteten kommerziellen Dotanden.<sup>[34]</sup> Zusätzlich zu ihren hohen Leitfähigkeiten zeichnen sich die Schichten durch eine geringe Absorption sichtbaren

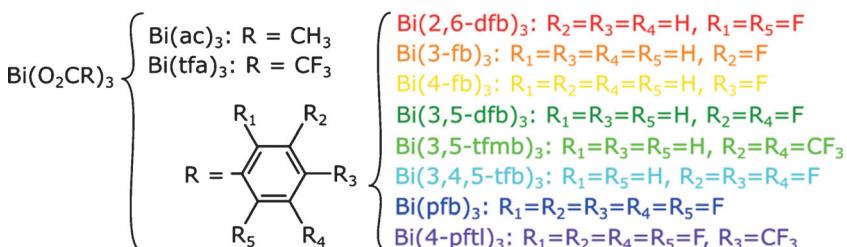
Lichts aus. UV-vis-NIR-Absorptionsspektren der reinen Dotanden zeigen eine optische Bandlücke (Beginn der Absorption) von 3.7–4.1 eV (siehe Spektren in Abbildung 4). Die Absorptionsspektren dünner Filme blieben unverändert, wenn die Filme für eine Stunde der Luft ausgesetzt wurden, was auf eine gute Stabilität der Dotanden, auch in dünnen Schichten, hinweist.

Die große optische Bandlücke dotierter Filme impliziert, dass der Dotand im unkoordinierten Zustand die Effizienz einer OLED nicht durch Eigenabsorption des erzeugten Lichts verringert. Tatsächlich zeigen mit Tris(benzoato)bismut(III)-Verbindungen dotierte HTMs nur eine sehr geringe Absorption im sichtbaren Bereich, die von der Dotierung herrührt (Abbildung 5). Coverdampfung zu 200 nm dicken Filmen im Stoffmengenverhältnis Dotand:HTM 1:2 mit 1-TNata,  $\alpha$ -NPB und spiro-TTB führt, verglichen mit dem reinen HTM-Material, nur zu einer geringfügig stärkeren Absorption zwischen 3.1 eV und 1.55 eV. Selbst im ungünstigsten Fall von Bi(4-pftl)<sub>3</sub> dotiert in spiro-TTB (1:2) ist die Absorption bei 2.40 eV (516 nm, grün) nur 1.65-mal stärker als die der undotierten spiro-TTB-Referenz. Wir weisen darauf hin, dass ein Stoffmengenverhältnis von 1:2 (Bi(4-pftl)<sub>3</sub> zu spiro-TTB) einem Volumenanteil des Dotanden im Halbleiter von ca. 15% entspricht. Abbildung 3 zeigt, dass eine vergleichbare Leitfähigkeit bereits mit niedrigeren Anteilen erreicht werden kann, woraus eine höhere Transparenz resultiert.

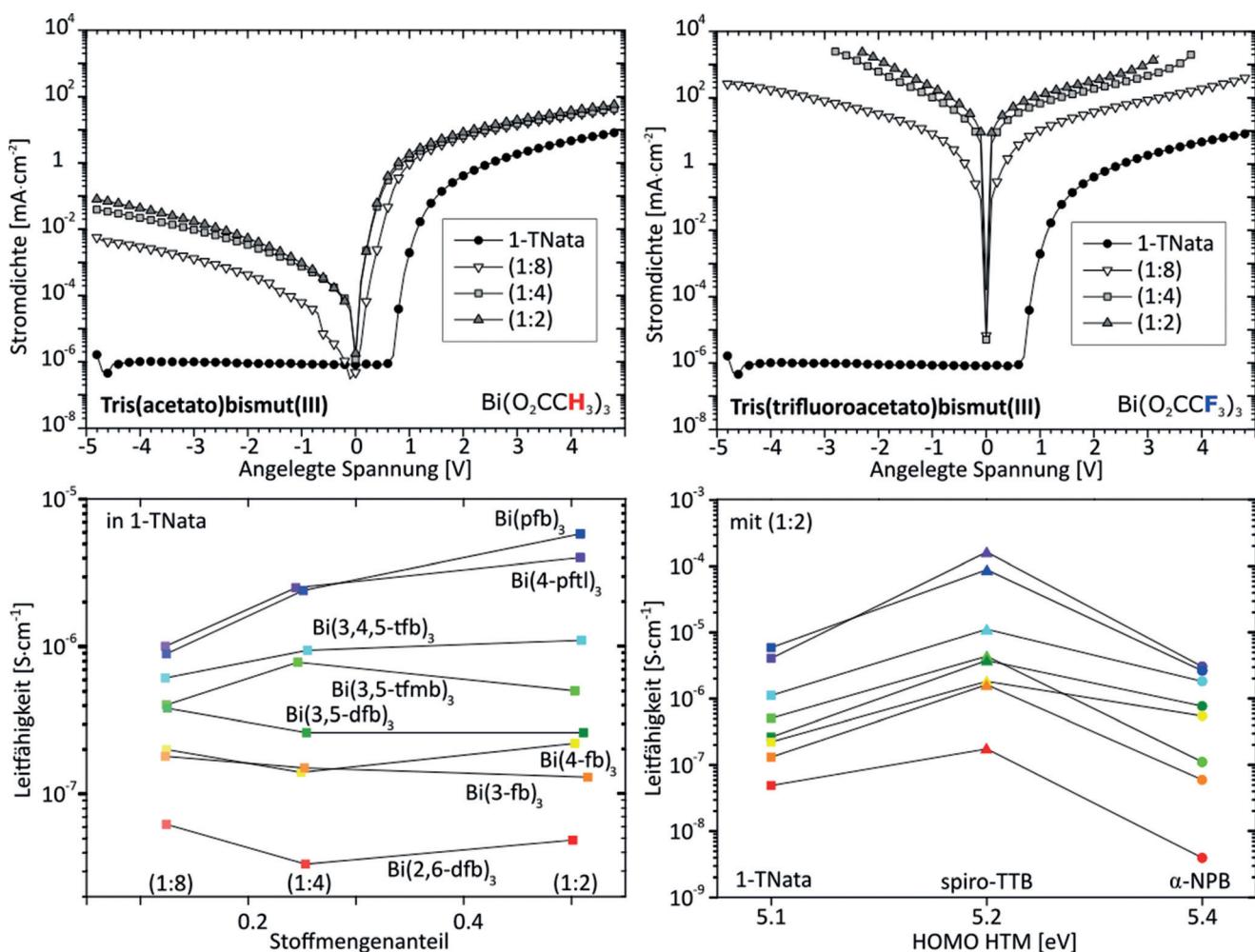
Die verwendeten Bismut-Verbindungen sind aufgrund der Elektrophilie der Bi<sup>III</sup>-Zentren, die durch die fluorierten Carboxylato-Liganden induziert wird, Lewis-sauer. Es wird daher erwartet, dass die HTM-Dotierung über einen Lewis-Säure-Base-Mechanismus erzeugt wird. Dies bedeutet, dass diese Donor-Akzeptor-Paare ein geringes Resonanzintegral  $\beta$  aufweisen und geschlossenschalige Komplexe mit geringer Elektronenabgabefähigkeit bilden.<sup>[10,25]</sup>

Das „neutrale“ Erscheinungsbild der dotierten Filme im ausgeschalteten Zustand ist im Einklang mit dem vorgeschlagenen Dotiermechanismus, bei dem keine stabilen und stark im sichtbaren Spektralbereich absorbierenden HTM<sup>+</sup>-Radikalkationen wie bei einem Redox-getriebenen Dotiermechanismus gebildet werden. Wir weisen darauf hin, dass Radikale zwar statistisch durch thermische Aktivierung gebildet werden können, es aber zu erwarten ist, dass sie für das Absorptionsspektrum keine signifikante Rolle spielen.<sup>[10]</sup>

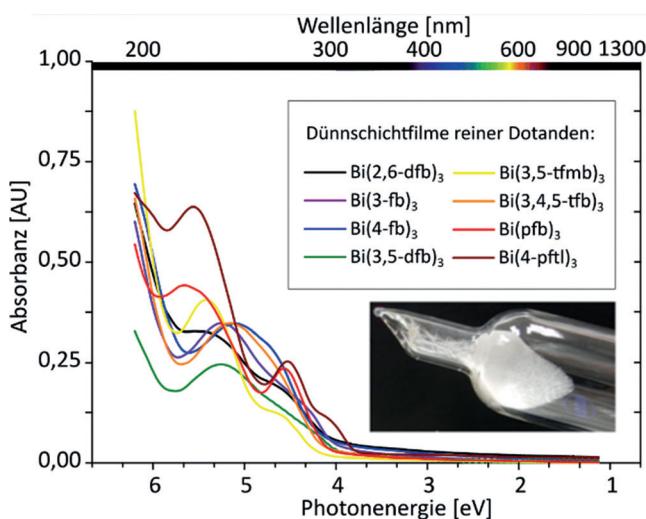
Einer der Bismut-Dotanden wurde auch in der Lochinjektionsschicht (HIL; hole injection layer) einer weißen OLED (WOLED) untersucht, um die Anwendbarkeit dieser Familie von p-Dotanden auch in vollständigen OLEDs zu zeigen (siehe Tabelle 1). Die Kenndaten der Bi<sup>III</sup>-dotierten Bauteile wurden mit denen von Referenzbauteilen verglichen, die denselben Aufbau aufweisen und sich lediglich in der HIL unterscheiden. Die HIL der Referenzbauteile wurde mit einem kommerziell erhältlichen p-Dotanden dotiert, der in der organischen Elektronik verbreitet Anwendung findet. Die Konzentrationen



**Abbildung 2.** Strukturformeln der als p-Dotanden verwendeten Tris(carboxylato)bismut(III)-Komplexe.



**Abbildung 3.** Stromdichte-Spannungs-Kennlinien von 200 nm dicken dotierten Filmen zwischen ITO- und Al-Elektroden. 1-TNata ( $4,4',4''$ -Tris(*N*-(1-naphthyl)-*N*-phenylamino)triphenylamin) dotiert mit unfluoriertem  $\text{Bi}(\text{ac})_3$  (oben links) und perfluoriertem  $\text{Bi}(\text{ta})_3$  (oben rechts). Leitfähigkeiten dotierter 1-TNata-Schichten mit unterschiedlichen Konzentrationen einer Serie fluorierter Benzoatobismut-Verbindungen (unten links) und Leitfähigkeiten von mit derselben Serie Dotanden dotierten 1-TNata-, spiro-TTB- ( $2,2',7,7'$ -Tetra(*N,N*-ditolyl)amino-9,9-spiro-bifluoren) und  $\alpha$ -NPB-Schichten (*N,N*'-Di(1-naphthyl)-*N,N*'-diphenylbenzidin) (unten rechts). HOMO-Energien wurden der Literatur entnommen.<sup>[31–33]</sup>



**Abbildung 4.** UV-vis-NIR-Absorptionsspektren dünner Filme (Dicke  $50 \pm 5 \text{ nm}$ ) der reinen p-Dotanden zeigen optische Bandlücken von ca. 4.0 eV.

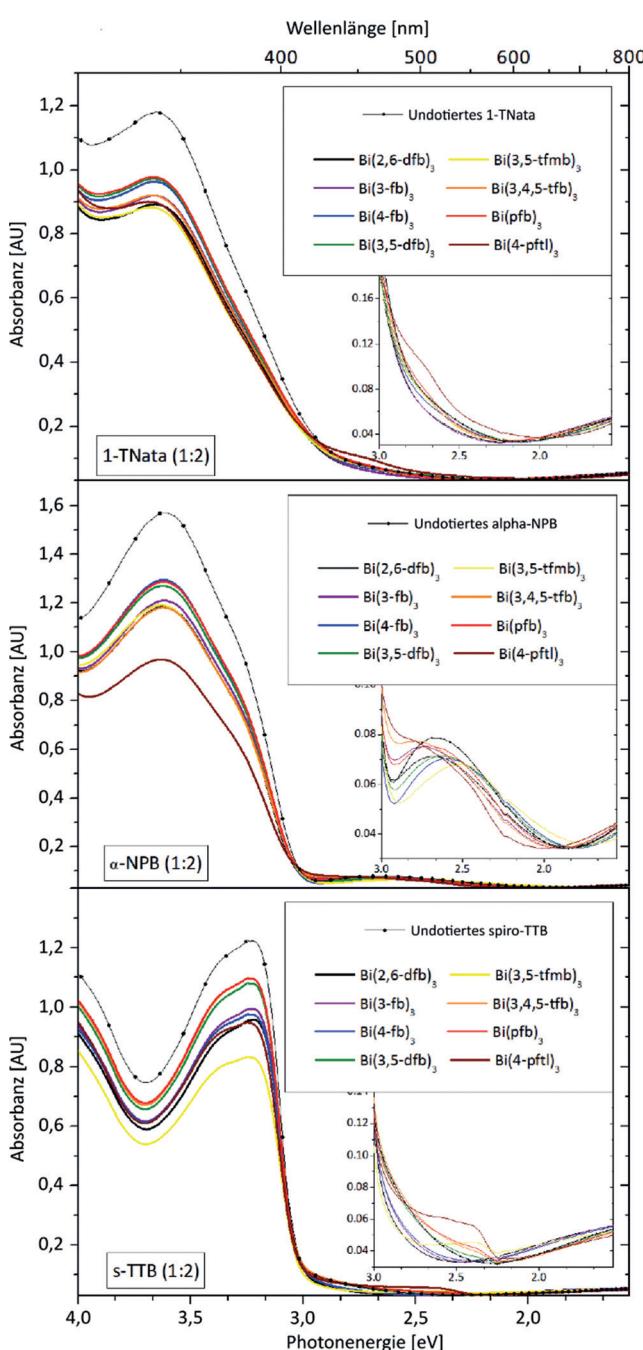
der beiden p-Dotanden wurden unabhängig voneinander optimiert.

Der Vergleich zeigt, dass der  $\text{Bi}^{\text{III}}$ -haltige Dotand in der WOLED eingesetzt werden kann, und dass die Eigenschaften der Bauteile hinsichtlich Effizienz, Betriebsspannung und Betriebslebensdauer vergleichbar zu WOLEDs aus dem Stand der Technik sind (Referenz). Die höhere EQE der  $\text{Bi}^{\text{III}}$ -dotierten Bauteile (trotz höherer Leuchtdichte) ist von besonderer Bedeutung und wird von uns auf eine niedrigere Absorption aufgrund der großen Bandlücke des Dotanden ( $> 3.1 \text{ eV}$ ) einerseits sowie die niedrige Absorption des CT-Komplexes andererseits zurückgeführt. Die niedrigere EQE der Referenz könnte zumindest teilweise durch Absorption des Dotanden verursacht werden, da dessen optische Bandlücke bei nur etwa 2.3 eV liegt.<sup>[32]</sup> Generell zeichnete sich ab, dass die  $\text{Bi}^{\text{III}}$ -Dotanden übliche p-Dotanden ersetzen können – ohne dass ein Wechsel des Matrixmaterials oder andere Anpassungen im organischen Schichtenaufbau nötig sind.

Des Weiteren ist die  $\text{Bi}^{\text{III}}$ -Verbindung in Ampullen-Tests bis zu mindestens  $300^\circ\text{C}$  (ca.  $70^\circ\text{C}$  oberhalb ihrer Sublimati-

**Tabelle 1:** Kenndaten von WOLEDs mit einer diffusen Auskoppelfolie und einer 140 nm dünnen HIL, die mit einem der Bi<sup>III</sup>-Dotanden bzw. einem kommerziell erhältlichen p-Dotanden dotiert ist. Messungen außer der LT70-Bestimmung wurden in einer Ulbricht-Kugel durchgeführt. LT70-Werte stammen von beschleunigten Messungen bei 25 °C und  $J = 30 \text{ mA cm}^{-2}$ .

Bauteil	$L [\text{cd m}^{-2}]$	$P_{\text{eff}} [\text{lm W}^{-1}]$	$I_{\text{eff}} [\text{cd A}^{-1}]$	EQE [%]	Cx/Cy	$U [\text{V}]$	$J [\text{mA cm}^{-2}]$	CCT [K]	LT70 [h]
Bi <sup>III</sup> -dotierte HIL	2700	37.6	71.7	31.6	0.420/0.400	6.0	3.8	3300	650
Referenz	1900	37.6	72.9	25.1	0.371/0.455	6.1	2.6	4600	610



**Abbildung 5:** UV-vis-Spektren von 200 nm dicken (1:2)-dotierten OSC-Filmen, erzeugt durch Coverdampfung mit den verschiedenen Tris(benzoato)bismut(III)-Dotanden im Vergleich mit den undotierten HTMs. Die Spektren zeigen, dass das Erscheinungsbild im ausgeschalteten Zustand auch nach der Dotierung neutral ist und die Dotierung keine sichtbare Farbänderung der Filme hervorruft.

onstemperaturen) stabil, während sich der Referenz-Dotand bei Bedingungen der thermogravimetrischen Analyse bei 289 °C zersetzt.<sup>[35]</sup> Oberhalb 300 °C verfärbt sich die Bi<sup>III</sup>-Verbindung. Allerdings zeigt die Elementaranalyse von bei 315 °C getempertem Material keinerlei Änderung der chemischen Zusammensetzung und suggeriert daher eine noch höhere thermische Stabilität.

Zusammenfassend wurde für diese Arbeit eine Serie Lewis-saurer Tris(carboxylato)-Bismut(III)-Komplexe mit unterschiedlicher Elektrophilie synthetisiert. Die Verbindungen führen in OSCs, die typischerweise als HTMs in OLEDs verwendet werden, zu unterschiedlich ausgeprägten Leitfähigkeitserhöhungen. Filme der reinen Dotanden sowie dotierter HTM-Filme absorbieren im sichtbaren Spektralbereich nur sehr schwach. Zusätzlich zu diesen idealen elektrischen und optischen Eigenschaften sind die Verbindungen leicht zu synthetisieren, vergleichsweise günstig und zeichnen sich durch eine hohe Luft- und Temperaturstabilität aus. Damit erfüllen sie alle Anforderungen für optoelektronische Anwendungen. Zu guter Letzt konnten wir auch zeigen, dass die Performance einer weißen OLED, deren HIL mit einer der neuen Verbindungen dotiert ist, mindestens so gut ist wie bei Verwendung eines kommerziellen Dotanden, der standardmäßig weit verbreitet in OLEDs verwendet wird.

## Danksagung

M.A.P. dankt der National Science Foundation (CHE-1608628 und CHE-1337594) für Unterstützung. Die Autoren (S.P., A.M., M. H., A.J., D.P., G.S.) danken dem deutschen Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) für eine Projektunterstützung unter Förderkennzeichen 13N22240 (OLYMP).

**Stichwörter:** Bismut · Donor-Akzeptor-Systeme · Dotierung · OLED · Organische Elektronik

**Zitierweise:** *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 10493–10497  
*Angew. Chem.* **2016**, *128*, 10649–10653

- [1] C. Zhang, P. Chen, W. Hu, *Small* **2016**, *12*, 1252.
- [2] F. Torricelli, L. Colalongo, D. Raiteri, Z.-M. Kovács-Vajna, E. Cantatore, *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 10550.
- [3] B.-C.-K. Tee, et al., *Science* **2015**, *350*, 313.
- [4] B.-H. Lee, B.-B.-Y. Hsu, S.-N. Patel, J. Labram, C. Luo, G.-C. Bazan, A.-J. Heeger, *Nano Lett.* **2016**, *16*, 314.
- [5] K. Pei, Z. Wang, X. Ren, Z. Zhang, B. Peng, P.-K.-L. Chan, *Appl. Phys. Lett.* **2015**, *107*, 033302.
- [6] R. Mertens, *The OLED Handbook*, <http://lulu.com>, **2015**.
- [7] B. Lüssem, M. Riede, K. Leo, *Phys. Status Solidi* **2013**, *210*, 9.

- [8] C.-H. Gao, X.-Z. Zhu, L. Zhang, D.-Y. Zhou, Z.-K. Wang, L.-S. Liao, *Appl. Phys. Lett.* **2013**, *102*, 153301.
- [9] J.-H. Lee, D.-S. Leem, J.-J. Kim, *Org. Electron.* **2010**, *11*, 486.
- [10] H. Méndez, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 7751; *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 7905.
- [11] C. Diez, T. C. G. Reusch, E. Lang, T. Dobbertin, W. Brüttling, *J. Appl. Phys.* **2012**, *111*, 103101.
- [12] R. Krause, *Optimierung der Ladungsträgerinjektion in Organische Leuchtdioden*; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, **2008**.
- [13] L. Chun-Jun, W. Yang, Y. Li-Xin, *Chin. Phys. Lett.* **2008**, *25*, 1832.
- [14] M. Pfeiffer, K. Leo, X. Zhou, J. S. Huang, M. Hofmann, A. Werner, J. Blochwitz-Nimoth, *Org. Electron.* **2003**, *4*, 89.
- [15] M. Kröger, S. Hamwi, J. Meyer, T. Riedl, W. Kowalsky, A. Kahn, *Org. Electron.* **2009**, *10*, 932.
- [16] J. Meyer, S. Hamwi, S. Schmale, T. Winkler, H.-H. Johannes, T. Riedl, W. Kowalsky, *J. Mater. Chem.* **2009**, *19*, 702.
- [17] S.-J. Yoo, J.-H. Lee, J.-H. Lee, J.-J. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **2013**, *102*, 183301.
- [18] J. Meyer, S. Hamwi, M. Kröger, W. Kowalsky, T. Riedl, A. Kahn, *Adv. Mater.* **2012**, *24*, 5408.
- [19] W. Brüttling, C. Adachi, *Physics of Organic Semiconductors*, 2nd ed., Wiley, New York, **2013**.
- [20] G. Schmid, J. H. Wemken, A. Maltenberger, C. Diez, A. Jaeger, T. Dobbertin, O. Hietsoi, C. Dubceac, M. A. Petrukhina, *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 878.
- [21] C. Ganzorig, M. Fujihira, *Appl. Phys. Lett.* **2000**, *77*, 4211.
- [22] Z. Bin, L. Duan, C. Li, D. Zhang, G. Dong, L. Wang, Y. Qiu, *Org. Electron.* **2014**, *15*, 2439.
- [23] P. Cias, C. Slagovc, G. Gescheidt, *J. Phys. Chem. A* **2011**, *115*, 14519.
- [24] B.-C. Wang, H.-R. Liao, J.-C. Chang, L. Chen, J.-T. Yeh, *J. Lumin.* **2007**, *124*, 333.
- [25] I. Salzmann, G. Heimel, M. Oehzelt, S. Winkler, N. Koch, *Acc. Chem. Res.* **2016**, *49*, 370.
- [26] B. Li, *Heterometallic Carboxylates Incorporating Bismuth*; Dissertation, University at Albany, NY, **2007**.
- [27] S. Pecqueur, *Lewis Acid-Base Theory Applied on Evaluation of New Dopants for Organic Light-Emitting Diodes*; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, **2014**.
- [28] B. Kugel, *Chemie und Koordinationchemie von Trifluoroacetaten von Bismut und Antimon*; Dissertation, Universität Düsseldorf, **2004**.
- [29] B. Li, H. Zhang, L. Huynh, C. Diverchy, S. Hermans, M. Deviliers, E. V. Dikarev, *Inorg. Chem.* **2009**, *48*, 6152.
- [30] A. S. Filatov, M. Napier, V. D. Vreshch, N. J. Sumner, E. V. Dikarev, M. A. Petrukhina, *Inorg. Chem.* **2012**, *51*, 566.
- [31] C. Schildknecht, *Iridium Carben Komplexe als Farbstoffe für tiefblaue organische Leuchtdioden*, Cuivillier, **2007**.
- [32] F. Lindner, K. Walzer, K. Leo, *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *93*, 233305.
- [33] S. Braun, W. Osikowicz, Y. Wang, W. R. Salaneck, *Org. Electron.* **2007**, *8*, 14.
- [34] F. Ante, D. Käblein, U. Zschieschang, T. W. Canzler, A. Werner, K. Takimiya, M. Ikeda, T. Sekitani, T. Someya, H. Klauk, *Small* **2011**, *7*, 1186.
- [35] Novaled OLED Materials for Display and Lighting Applications. [www.novaled.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/downloadcenter/Novaled\\_Material.pdf](http://www.novaled.com/fileadmin/user_upload/pdf/downloadcenter/Novaled_Material.pdf) (accessed May 12, **2016**).

Eingegangen am 24. Februar 2016  
Online veröffentlicht am 21. Juli 2016