

Vernetzbare Lochleiter für blau phosphoreszierende organische Leuchtdioden**

Philipp Zacharias, Malte C. Gather, Markus Rojahn, Oskar Nuyken und Klaus Meerholz*

Organische Leuchtdioden (OLEDs) verfügen über Eigenschaften wie niedrigen Stromverbrauch, geringes Gewicht, kurze Ansprechzeiten und große Betrachtungswinkel, die sie zu vielversprechenden Bauelementen für Anwendungen in Leuchtmitteln und Displays machen.^[1] Zur Herstellung von OLEDs sind Verfahren in Lösung (z. B. Rotationsbeschichtung) gegenüber Aufdampfverfahren häufig vorzuziehen, insbesondere bei der Rolle-zu-Rolle-Fertigung großflächiger Substrate. Bei der Anfertigung von Mehrschichtbauelementen aus Lösungen ist aber darauf zu achten, dass zuvor aufgetragene Schichten bei der Auftragung der nächsten Schicht nicht abgelöst werden. Eine Strategie, um dies zu verhindern, ist die Einführung von Vorstufenmaterialien mit polymerisierbaren Gruppen, die nach dem Auftragen vernetzt werden. Oft beeinträchtigt dies jedoch die elektrischen Eigenschaften.^[2] Wir haben in der Vergangenheit Oxetan-funktionalisierte Derivate des Lochleiters Triphenylamin-Dimer (TPD) und von elektrolumineszenten Polyfluorenen eingeführt.^[3] Wir konnten zeigen, dass dünne Schichten des Materials durch photoinitierte kationische Ringöffnungspolymerisation (CROP) vernetzt und damit unlöslich gemacht werden können, ohne dass die elektrischen Eigenschaften beeinträchtigt werden.^[4] Für die Synthese macht man sich zunutze, dass Oxetane zwar im Sauren reagieren, gegenüber Basen aber stabil sind.

Die Lichtemission in OLEDs basiert auf dem strahlenden Zerfall angeregter Zustände, die sich bilden, wenn Löcher und Elektronen rekombinieren. Nach Rekombination beträgt der Spinstatistik zufolge das Verhältnis von Triplett- zu Singulettzuständen 3:1. Somit gehen in Materialien, die aus dem Singulett-Zustand emittieren (fluoreszieren), 75 % der angeregten Zustände verloren. Vermeiden lässt sich dieser Verlust durch Verwendung von Übergangsmetallkomplexen, die aus dem Triplett-Zustand emittieren (phosphoreszieren).^[5] Zur

effizienten Ladungsinjektion in die Emissionsschicht werden eine oder mehrere Schichten von Loch- und Elektronenleitern benötigt.^[6,7]

Wir hatten bereits über die Synthese, Charakterisierung und Anwendung von Oxetan-funktionalisierten vernetzbaren TPDs (XTPDs) mit HOMO-Energien zwischen -5.1 und -5.3 eV (bezogen auf Vakuum) berichtet.^[8] OLEDs, die Lochtransportschichten (HTLs) aus solchen XTPDs enthalten, haben ein ausgezeichnetes Leistungsprofil, in Kombination sowohl mit vielen fluoreszierenden als auch mit rot und grün phosphoreszierenden Materialien.^[7] Zum Aufbau von blauen Triplett-Emittern war das Konzept bisher wenig erfolgreich, hauptsächlich wegen der unzureichenden Lochinjektion in das HOMO dieser Materialien, das typischerweise bei -6 eV liegt.^[6]

Wir berichten hier über die Synthese sowie die thermomechanischen und elektrochemischen Eigenschaften einer Reihe neuer XTPDs mit HOMO-Energien (E_{HOMO}) bis -5.8 eV. Wir verwenden diese XTPDs, um effizient blau phosphoreszierende OLEDs herzustellen, und weisen nach, dass die Lichtausbeute direkt mit der HOMO-Energie des XTPD korreliert.

Die neuen XTPDs (**1–12**, Schema 1) wurden durch Pd-katalysierte aromatische Aminierung (Hartwig-Buchwald-Reaktion) aus den entsprechenden Benzidin-Derivaten und (gegebenenfalls zwei verschiedenen) Bromarenen synthetisiert.^[9] Die höhere Reaktivität von primären gegenüber sekundären Aminen in der Hartwig-Buchwald-Reaktion wurde genutzt, um hohe Selektivitäten zu erzielen.

Die Alkylether-Einheit zwischen dem aromatischen System und dem Oxetan fungierte als Linker und Abstandshalter zugleich; sie bindet die Oxetangruppe flexibel an, gewährleistet eine gute Löslichkeit des Monomers und verhindert außerdem eine Kristallisation, was wichtig für die Bildung homogener Filme ist. XTPDs mit zwei Alkylether-Oxetan-Einheiten haben Glasübergangstemperaturen (T_g) um 0°C , mit vier Alkylether-Oxetan-Einheiten liegt T_g bei etwa -30°C (Tabelle 1). Das Oxidationspotential (E_{ox}) und die UV/Vis-Spektren von **11** und **12** sind im Rahmen der Messgenauigkeit identisch. Das bedeutet, dass die Zahl der Alkylether-Oxetan-Einheiten die thermomechanischen, nicht jedoch die elektrochemischen und optischen Eigenschaften beeinflusst. Durch die vernetzende Polymerisation steigt T_g erheblich an: Für Poly-**12** liegt T_g bei 101°C , und für Poly-**11** konnte bis 300°C überhaupt kein Glasübergang beobachtet werden, wahrscheinlich wegen eines höheren Vernetzungsgrades.

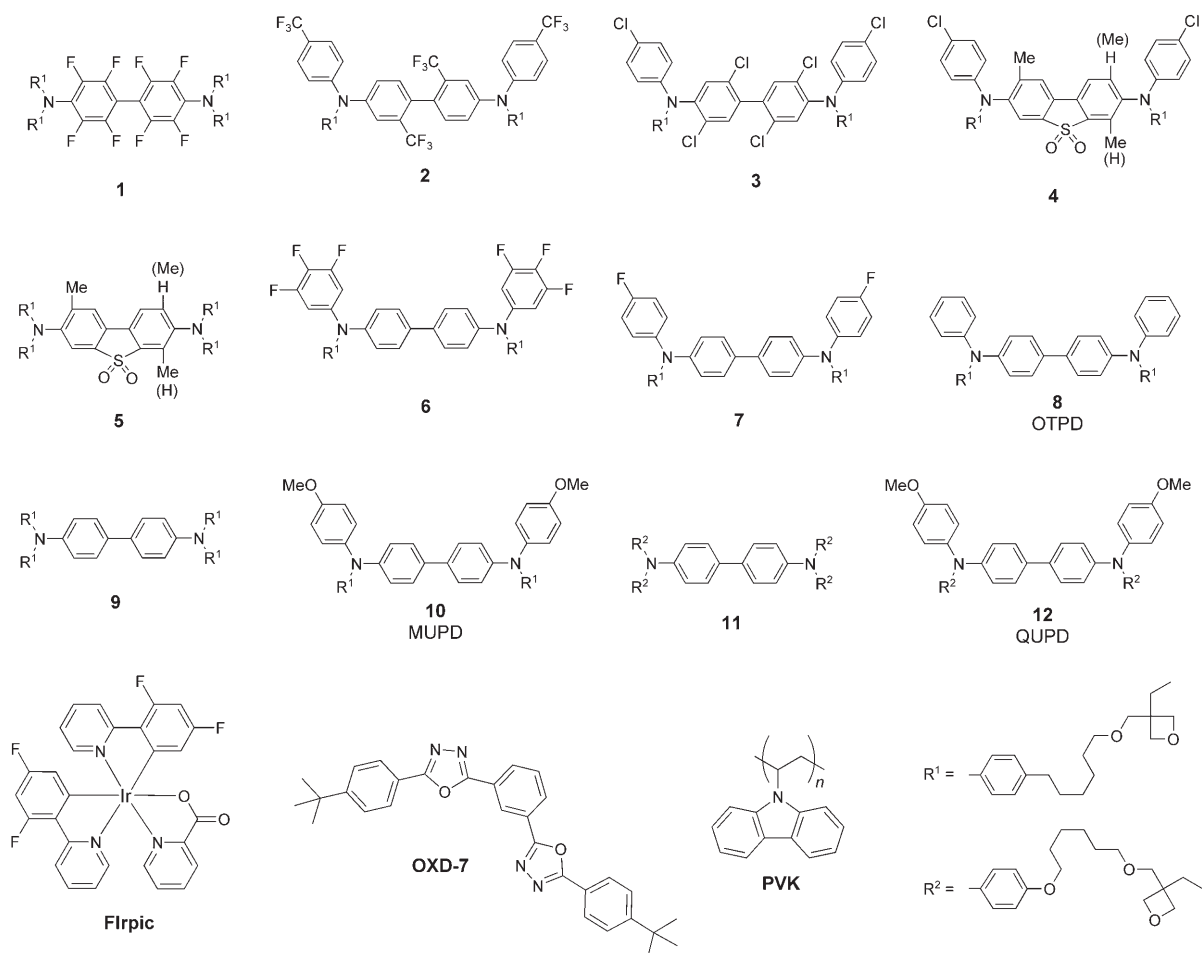
Zwei Konzepte wurden genutzt, um die HOMO-Energien der XTPDs gezielt einzustellen: Zum einen wurde E_{HOMO} durch Donorsubstituenten wie Alkoxy- oder Alkylgruppen

[*] P. Zacharias, M. C. Gather, Prof. K. Meerholz
Universität zu Köln, Physikalische Chemie
Luxemburger Straße 116, 50939 Köln (Deutschland)
Fax: (+49) 221-470-5144
E-Mail: klaus.meerholz@uni-koeln.de

M. Rojahn, Prof. O. Nuyken
Technische Universität München
Lehrstuhl für Makromolekulare Stoffe
Lichtenbergstraße 4, 85747 Garching (Deutschland)

[**] Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt. Wir danken Dr. Jürgen Steiger (De-gussa, Marl) für die UPS-Daten und Georgios Liaptsis (Universität zu Köln) für seine Hilfe bei der Synthese.

Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind im WWW unter <http://www.angewandte.de> zu finden oder können beim Autor angefordert werden.



Schema 1. Oxetan-funktionalisierte TPD-Derivate **1–12** und Komponenten blau phosphoreszierender OLEDs.

Tabelle 1: Elektrochemische und thermomechanische Daten der untersuchten XTPDs (siehe Schema 1).

XTPD	E_{ox} [V] ^[a]	E_i [eV] ^[c]	E_{HOMO} [eV] ^[b]	T_g [°C]
1	0.79	5.80	–5.79	–26
2	0.77	5.95	–5.78	1
3	0.74	5.80	–5.75	7
4	0.63	5.50	–5.65	–2
5	0.49	5.50	–5.53	–27
6	0.46	–	–5.50	–1
7	0.28	–	–5.34	0
8	0.24	5.45	–5.30	–5
9	0.19	5.40	–5.26	–34
10	0.13	5.10	–5.21	–1
11	0.08	–	–5.16	–27
12	0.07	5.25	–5.15	–1
PVK	≥ 0.80 ^[c]	–	–5.84 ^[d]	≈ 200
OXD-7	–	–	–6.30 ^[13]	–
Flrpic	0.90	–	–5.89	–
PEDOT	–	5.10	–5.10 ^[14]	–

[a] Alle Verbindungen zeigten reversibles Redoxverhalten. [b] Berechnet aus E_{ox} nach Gleichung (1). [c] Irreversibel. [d] Berechnet nach der hier entwickelten Extrapolationsmethode. [e] UPS-Messung.

erhöht und durch Akzeptoren wie Cl, F, CF₃ oder SO₂ verringert. Zum anderen wurden Substituenten in den Positionen 2, 2', 6 und 6' des Biphenylkerns eingeführt, um einen großen

Torsionswinkel vorzugeben, wodurch E_{HOMO} wegen der nun verringerten Elektronendelokalisierung noch weiter herabgesetzt wird.^[10] Um eine oxidative Dimerisierung zu verhindern, wurden bei allen TPDs mit Substituenten am Biphenylkern die *para*-Positionen zum Stickstoff blockiert (durch Alkyl, CF₃ oder Cl statt H).^[11] Es sei darauf hingewiesen, dass das veränderte Substitutionsmuster nicht nur E_{HOMO} , sondern auch die Lochmobilität beeinflusst. Allerdings sind diese Effekte nicht einfach zu fassen, da – neben anderen Faktoren – die Morphologie des Lochtransportmaterials eine wichtige Rolle spielt.

Cyclovoltammetrie (CV) und UV-Photoelektronenspektroskopie (UPS) wurden eingesetzt, um die E_{HOMO} -Werte der XTPDs zu ermitteln. CV bestimmt das Oxidationspotential E_{ox} als die Energie, die notwendig ist, um ein Elektron vom Molekül zu entfernen, wenn es von Lösungsmittel umgeben ist und sich in der Gegenwart eines Elektrolyten befindet. UPS misst das Ionisationspotential E_i als die Energie, die aufgebracht werden muss, um dieses Elektron von einem Molekül auf der Oberfläche eines Feststoffs ins Vakuum zu entfernen. E_{ox} und E_i sind miteinander verknüpft, die genaue Korrelation variiert aber je nach experimentellem Aufbau und je nach Molekülsorte.

Das Oxidationspotential der Verbindungen **1–12** wurde durch CV in CH₂Cl₂ gemessen (Tabelle 1). Der experimen-

telle Fehler liegt etwa bei ± 10 mV. Die Verlässlichkeit von UPS-Messungen ist im Allgemeinen niedriger ($\Delta E_i = \pm 100$ mV),^[6] weshalb wir die UPS-Daten lediglich verwendeten, um die Korrelation zwischen E_i und E_{Ox} zu bestimmen. E_{HOMO} ($= -E_i$) berechneten wir dann aus den E_{Ox} -Werten (Tabelle 1). Dabei wurde die lineare Korrelation (1) gefunden.

$$E_i = (5.1 \pm 0.05) \text{ eV} + E_{Ox} \times (0.9 \pm 0.1) \text{ eV V}^{-1} \quad (1)$$

Es ist wichtig anzumerken, dass diese Korrelation von der Polarität des für die CV verwendeten Lösungsmittels abhängt. Dies wird deutlich aus dem Zusammenhang, den wir zwischen dem Oxidationspotential in CH_2Cl_2 und CH_3CN gefunden haben [Gl. (2)].

$$E_{Ox}^{\text{CH}_3\text{CN}} = (0.12 \pm 0.01) \text{ V} + E_{Ox}^{\text{CH}_2\text{Cl}_2} (0.84 \pm 0.02) \quad (2)$$

Um zu zeigen, dass die XTPDs die Lochinjektion in blau phosphoreszierende OLEDs verbessern können, haben wir mehrere Bauelemente hergestellt, die aus einer oder drei Schichten eines XTPD und einer Schicht aus dem blauen Phosphoreszenzemitter FIrpic in einer Matrix aus PVK und dem Elektronenleiter OXD-7 bestanden (Schema 1). Die Bauelemente hatten folgenden Aufbau: ITO/PEDOT: PSS(35 nm)/XTPDs (je 8 nm)/PVK:OXD-7:FIrpic (67:28:5 Gew.-%; 75 nm)/CsF(4 nm)/Al(70 nm) (Abbildung 1).^[7,12]

In Abbildung 2 und Tabelle 2 werden die Daten einiger dieser Bauteile sowie Literaturdaten verglichen. Unsere Referenz-OLED (ohne XTPD-Schicht) erreicht eine maximale Lichtausbeute (LE_{max}) von 17 cd A^{-1} bei einer Helligkeit von

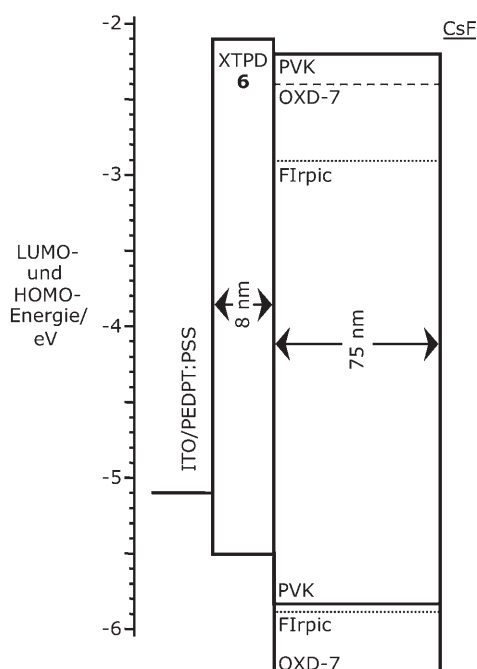


Abbildung 1. HOMO/LUMO-Energien und Schichtaufbau am Beispiel des Bauelements mit XTPD **6**. ITO: Indiumzinnoxid; PEDOT: Poly(3,4-ethyldioxythiophen); PSS: Polystyrolsulfonat.

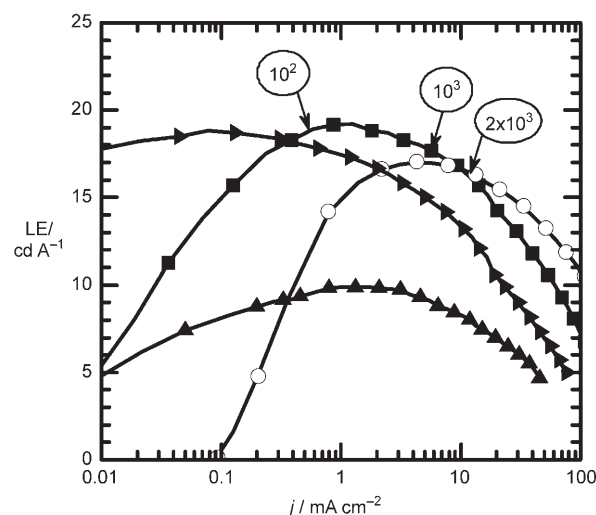


Abbildung 2. Lichtausbeute (LE) als Funktion der Stromdichte (j) der blau phosphoreszierenden OLEDs ohne (\circ) und mit XTPDs (\blacksquare , \blacktriangleright , \blacktriangle , \bullet). Die eingekreisten Werte geben die Helligkeit ($j \times LE$) des Bauelements (Quadrat) in cd m^{-2} an.

700 cd m^{-2} . Dies stimmt mit jüngsten Studien ähnlicher Bauelemente überein: Yang et al. berichteten über eine maximale Lichtausbeute von 18 cd A^{-1} bei 200 cd m^{-2} .^[13] Mathai et al. fanden höhere Lichtausbeuten von 22 cd A^{-1} , allerdings trat das Maximum bei sehr niedriger Helligkeit (26 cd m^{-2}) auf, und bei 700 cd m^{-2} hatte die Lichtausbeute auf 20 cd A^{-1} abgenommen.^[14] Wir rechnen die fehlenden 15 % Lichtausbeute einer verbleibenden Elektroneninjektionsbarriere in unseren OLEDs zu, die durch eine Optimierung der CsF-Kathode überwunden werden könnte.

In dem für Anwendungen interessanten Helligkeitsbereich ($< 2000 \text{ cd m}^{-2}$) wird die Lichtausbeute merklich erhöht, wenn man eine einzelne Lochtransportschicht aus **6** in das Bauelement integriert (Abbildung 2). Gegenüber der Referenz ohne HTL (17 cd A^{-1}) steigt die maximale Lichtausbeute auf 19.2 cd A^{-1} , und die Einschaltspannung der Elektrolumineszenz wird um 1.3 V auf 3.1 V verringert (Tabelle 2).

Unterhalb von 0.4 mA cm^{-2} (oder 70 cd m^{-2}) wurden die besten Lichtausbeuten für eine OLED mit drei XTPD-Schichten (**12/8/6**) erhalten. Es ist wichtig anzumerken, dass das **8/6/4**-Dreifach-HTL-Bauelement keine bessere Lichtausbeute zeigt als das Bauelement mit einer einfachen HTL aus **6**, obwohl die Lochinjektionsbarriere in noch kleinere Stufen unterteilt wird (Abbildung 1 und 2). Außerdem ist mit zunehmender Zahl der XTPD-Schichten (wie durch „optisches Modeling“ vorhergesagt) eine Blauverschiebung der Elektrolumineszenz zu beobachten (vgl. die Farbkoordinaten in Tabelle 2).

In Abbildung 3 sind die maximalen Lichtausbeuten aller Einfach-HTL-OLEDs gegen den E_{HOMO} -Wert der entsprechenden XTPDs aufgetragen. Es tritt ein deutliches Maximum für die Verbindung **6** auf, und zu höheren und niedrigeren HOMO-Energien fallen die Lichtausbeuten ungefähr gleichmäßig ab. In Übereinstimmung mit unseren Erwartungen liegt das Maximum genau in der Mitte zwischen den Energieniveaus von PEDOT:PSS und PVK. An diesem Punkt

Tabelle 2: Charakteristika der mit XTPDs als Lochtransportschicht gefertigten OLEDs.

HTL	$LE_{\max}^{[a]}$ [cd A ⁻¹]	U [V]	$LE_{1000\text{ cd m}^{-2}}^{[a]}$ [cd A ⁻¹]	U [V]	$PE_{\max}^{[b]}$ [lm W ⁻¹]	U [V]	$L_{\text{on}}^{[c]}$ [V]	$x/y^{[d]}$
6	19.2	6.3	17.7	8.1	10.2	5.4	3.1	0.170/0.365
8/6/4	9.9	7.8	7.9	11.3	4.9	4.5	3.0	0.165/0.360
12/8/6	18.8	4.5	14.3	8.9	15.4	3.6	2.7	0.165/0.360
–	17.0	7.2	16.9	7.5	7.9	6.6	4.4	0.170/0.370
12/8 ^[7]	11.5	7.2	9.3	11.0	8.0	5.5	3.0	–
– ^[7]	15.0	6.7	13.1	9.1	7.2	5.7	4.8	–
– ^[14]	22.0	5.6	19.0	7.7	14.0	4.9	–	0.170/0.370

[a] Fehler $\pm 0.1\text{ cd A}^{-1}$. [b] PE = Leistungseffizienz bei der Spannung U ; Fehler: $\pm 0.1\text{ lm W}^{-1}$. [c] Einschaltspannung (Helligkeit $> 10^{-2}\text{ cd m}^{-2}$). [d] Farbkoordinaten (CIE), Fehler ± 0.005 .

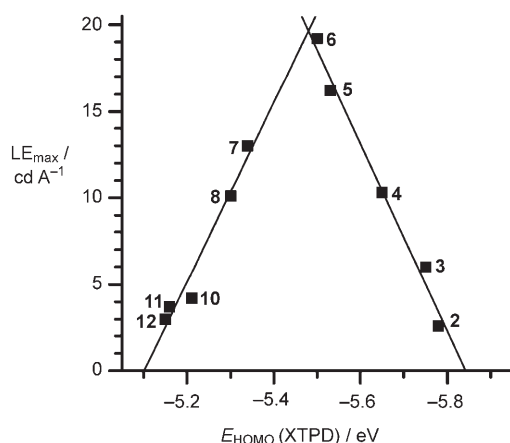


Abbildung 3. Maximale Lichtausbeuten der OLEDs mit einfacher HTL als Funktion von E_{HOMO} des entsprechenden XTPD. Lineare Anpassung für 2–6 und 7–12. Die einzelnen LE-j-Diagramme sind in den Hintergrundinformationen hinterlegt.

ist die Lochinjektionsbarriere in zwei gleich große Stufen unterteilt. Überraschenderweise ist die Korrelation zwischen E_{HOMO} und der OLED-Lichtausbeute beidseitig linear. Dies ermöglicht eine Extrapolation zu den Grenzfällen eines Bauelements mit einer HTL, deren HOMO mit den angrenzenden Schichten – also PEDOT:PSS am oberen Limit oder PVK am unteren Limit – abgeglichen ist. Der resultierende Wert von -5.1 eV für PEDOT:PSS stimmt perfekt mit Literaturwerten überein.^[15] Wegen der irreversiblen Oxidation im Verlauf der CV-Messung kann das Oxidationspotential von PVK elektrochemisch nicht direkt bestimmt werden. Gemäß der Extrapolation nach Abbildung 3 ist $E_{\text{HOMO}} = -5.85\text{ eV}$ zu erwarten. Wir glauben, dass dies eine einzigartige Methode ist, um das HOMO von PVK zu messen.

Durch Einsatz von vernetzbaren Triphenylamin-Dimeren mit HOMO-Energien bis hinab zu -5.8 eV gelang der Aufbau effizienter phosphoreszierender OLEDs mit verbessertem Leistungsprofil. Bauelemente mit fünf organischen Schichten konnten durch Lösungsverfahren hergestellt werden. In den von uns untersuchten Verbindungen sind die Oxetan-Einheiten wirksam vom elektro-optisch aktiven Molekülteil getrennt, sodass sich die meisten unserer Schlussfolgerungen auf TPDs in Allgemeinen übertragen lassen.

Experimentelles

Hartwig-Buchwald-Kupplung: Eine Lösung des Diamins in wasserfreiem Toluol (20 mL pro mmol Diamin) wurde unter Argon mit dem Bromaren (2.2 Äquiv.) und NaOrBu (1.5 Äquiv. pro umzusetzender N-H-Bindung) versetzt. Der Katalysator wurde aus $[\text{Pd}_2(\text{dba})_3]$ (dba = Dibenzylidenacetone) (Pd/N 0.02:1) und PrBu_3 (P/Pd 0.8:1; Aldrich, 98 %) durch Lösen in wasserfreiem Toluol in einer N_2 -Handschuhbox frisch angesetzt. Vor Zugabe des Katalysators wurde die Reaktionslösung entgast und auf die Reaktionstemperatur erhitzt (je nach Ansatz zwischen

25°C und 110°C). Der Reaktionsfortgang wurde mittels Dünnschichtchromatographie oder ESI-MS (10- μL -Proben, Abbruch der Reaktion mit MeOH) verfolgt. Nach Beendigung der Reaktion wurde die Mischung 1:1 mit *tert*-Butylmethylether (TBME) verdünnt, mit Wasser gewaschen, mit TBME extrahiert und über MgSO_4 getrocknet. Nach Entfernen des Lösungsmittels, Reinigung des erhaltenen Öls durch Mitteldruck-Flüssigchromatographie (Toluol/EtOAc über Silica, 20 mL min^{-1}), Mikrofiltration (EtOAc-Lösung über $0.45\text{ }\mu\text{m}$ Polyvinylidenfluorid (PVDF)) und Vakuumtrocknung (10^{-5} bar) wurden die Produkte in Ausbeuten zwischen 44 und 84 % erhalten. Die Reinheit der Verbindungen wurde mit ^1H -, ^{13}C - und ^{19}F -NMR-Spektroskopie (Bruker, 300 MHz für ^1H , CDCl_3), ESI-MS (Thermo Finnigan MAT 900ST) und Elementaranalyse bestätigt. T_g -Werte wurden auf einem Mettler Toledo DSC821^e aus der identischen zweiten und dritten Aufheizkurve bestimmt. Cyclovoltammogramme wurden mit einem Potentiostat/Galvanostat (EG + G Instruments M283) in CH_2Cl_2 (10^{-3} M) mit NBu_4PF_6 (10^{-1} M) als Leitsalz aufgenommen. Die Potentiale sind auf das Ferrocen/Ferrocenium-Redoxpaar bezogen. UV-Photoelektronenspektren wurde an einem Riken AC-2 aufgenommen.

Die OLEDs wurden auf mit ITO beschichteten Glassubstraten hergestellt. Die Substrate wurden gereinigt und ozonisiert. Eine Schicht PEDOT:PSS (35 nm, Baytron P, Al4083, H. C. Starck) wurde durch Rotationsbeschichtung auf die Substrate aufgetragen und 80 s bei 110°C getrocknet. Die Substrate wurden in eine N_2 -Handschuhbox überführt, und die XTPD-Schichten wurden aus einer Toluollösung ($2\text{--}5\text{ mg mL}^{-1}$), die 4.0 Mol-% des Photoinitiators 4-Octyloxydiphenyliodonium-hexafluoroantimonat (OPPI) enthielt, durch Rotationsbeschichtung aufgetragen. Die Filme wurden 10 s mit UV-Licht bestrahlt (360 nm) und 60 s bei 100°C getempert, bis vollständige Vernetzung eingetreten war.^[8] Auf die XTPD-Schicht(en) wurde eine Mischung aus PVK, OXD-7 (28 Gew.-%) und Irpic (5 Gew.-%), gelöst in Chlorbenzol (15 mg mL^{-1}), durch Rotationsbeschichtung aufgetragen. Anschließend wurde die Kathode bei 10^{-9} bar thermisch aufgedampft. Strom-Spannungs-Helligkeits-Kennlinien wurden mit einem Amperemeter (Keithley 2400) und einer kalibrierten Photodiode gemessen.

Eingegangen am 14. Dezember 2006

Online veröffentlicht am 4. Mai 2007

Stichwörter: Elektrochemie · Elektrophosphoreszenz · Ladungsträgerinjektion · Leuchtdioden · Oxetan

- [1] a) S. R. Forrest, *Nature* **2004**, 428, 911; b) B. W. D'Andrade, S. R. Forrest, *Adv. Mater.* **2004**, 16, 1585; c) A. Misra, P. Kumar, M. N. Kamalasanan, S. Chandra, *Semicond. Sci. Technol.* **2006**, 21, R35.
[2] a) E. Bellmann, S. E. Shaheen, S. Thayumanavan, S. Barlow, R. H. Grubbs, S. R. Marder, B. Kippelen, N. Peyghambarian,

- Chem. Mater.* **1998**, *10*, 1668; b) A. Bacher, P. G. Bentley, D. D. C. Bradley, L. K. Douglas, P. A. Glarvey, M. Grell, K. S. Whitehead, M. L. Turner, *J. Mater. Chem.* **1999**, *9*, 2985.
- [3] a) M. S. Bayerl, T. Braig, O. Nuyken, D. C. Müller, M. Groß, K. Meerholz, *Macromol. Rapid Commun.* **1999**, *20*, 224; b) K. Meerholz, C. D. Müller, O. Nuyken in *Organic Light-Emitting Devices: Synthesis, Properties and Applications* (Hrsg.: K. Müllen, U. Scherf), Wiley-VCH, Weinheim, **2005**, S. 426.
- [4] a) E. Bacher, S. Jungermann, M. Rojahn, V. Wiederhirn, O. Nuyken, *Macromol. Rapid Commun.* **2004**, *25*, 1191; b) C. D. Müller, A. Falcou, N. Reckefuss, M. Rojahn, V. Wiederhirn, P. Rudati, H. Frohne, O. Nuyken, H. Becker, K. Meerholz, *Nature* **2003**, *421*, 829; c) M. Gather, A. Köhnen, A. Falcou, H. Becker, K. Meerholz, *Adv. Funct. Mater.* **2007**, *17*, 191.
- [5] a) M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Nature* **1998**, *395*, 151; b) Y. R. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. W. Ma, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Nature* **2006**, *440*, 908.
- [6] B. W. D'Andrade, S. Datta, S. R. Forrest, P. Djurovich, E. Polikarpov, M. E. Thompson, *Org. Electron.* **2005**, *6*, 11.
- [7] X. H. Yang, C. D. Müller, D. Neher, K. Meerholz, *Adv. Mater.* **2006**, *18*, 948.
- [8] D. C. Müller, T. Braig, H.-G. Nothofer, M. Arnoldi, M. Gross, U. Scherf, O. Nuyken, K. Meerholz, *ChemPhysChem* **2000**, *1*, 207.
- [9] a) A. R. Muci, S. L. Buchwald, *Top. Curr. Chem.* **2002**, *219*, 131; b) J. F. Hartwig in *Handbook of Organopalladium Chemistry for Organic Synthesis*, Vol. 1 (Hrsg.: E. Negishi), Wiley, New York, **2002**, S. 1051; c) S. Thayumanavan, S. Barlow, S. R. Marder, *Chem. Mater.* **1997**, *9*, 3231.
- [10] P. J. Low, M. A. J. Paterson, D. S. Yufit, J. A. K. Howard, J. C. Cherryman, D. R. Tackley, R. Brook, B. Brown, *J. Mater. Chem.* **2005**, *15*, 2304.
- [11] P. J. Low, M. A. J. Paterson, A. E. Goeta, D. S. Yufit, J. A. K. Howard, J. C. Cherryman, D. R. Tackley, B. Brown, *J. Mater. Chem.* **2004**, *14*, 2516.
- [12] Entgegen Berichten in der Literatur fanden wir, dass 5 Gew.-% FIrpic bessere Lichtausbeuten ergaben als 10 Gew.-%.
- [13] X. H. Yang, F. Jaiser, S. Klinger, D. Neher, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 021107.
- [14] M. K. Mathai, V. E. Choong, S. A. Choulis, B. Krummacker, F. So, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 243512.
- [15] N. Koch, A. Kahn, J. Ghijsen, J. J. Pireaux, J. Schwartz, R. L. Johnson, A. Elschner, *Appl. Phys. Lett.* **2003**, *82*, 70.